



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Influência dos parâmetros geotécnicos na qualidade do desmonte de maciços rochosos fracturados

Ana Catarina Ferreira Dias



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Influência dos parâmetros geotécnicos na qualidade do desmonte de maciços rochosos fracturados

Ana Catarina Ferreira Dias

Nº 1080575

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Doutor António Carlos Galiza, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

Júri

Presidente

Doutor Hélder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor António Carlos Reis Galiza Carneiro

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Luís Carlos Correia Ramos

Assistente 2º Triénio convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José António Simões Cortez

Professor Catedrático Jubilado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Consultor de Engenharia em Multisequência – Unipessoal Lda.

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi defendida em prova pública, pela Licenciada Ana Catarina Ferreira Dias, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 06 de Novembro de 2013 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **17 (dezassete) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta.*

O Director do MEGG/ISEP

Dedico esta tese aos meus Pais que me deram o apoio e a possibilidade de investir na minha formação. Dedico ao meu namorado Daniel Monteiro por todo o apoio, paciência e ajuda nesta fase de conclusão de mais uma etapa.

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos os quantos, de uma ou de outra forma, me ajudaram na elaboração da presente dissertação, em particular:

- Ao meu orientador Doutor A. Carlos Galiza (ISEP), expresso o meu agradecimento pelo apoio na realização das diferentes fases do trabalho, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e da leitura atenta da presente dissertação;
- Ao mestre Luís Ramos (Elevogroup), expresso o meu sincero reconhecimento pela forma prestável e dedicada no apoio prestado quer no terreno quer no gabinete. Pela partilha de documentação sobre geomecânica e engenharia de maciços rochosos. No apoio da realização das diferentes fases do trabalho e, sobretudo, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e da leitura atenta do presente trabalho;
- Ao Doutor José Teixeira, pela disponibilidade e auxílio prestado na integração dos dados cartografados;
- À Doutora Maria José Afonso, pela disponibilidade e ajuda no esclarecimento de dúvidas;
- Ao meu namorado Engº Daniel Monteiro, pela paciência e ajuda na elaboração nas várias fases da presente dissertação;
- Ao Engº Rogério Pinheiro (ISEP), pela disponibilidade e ajuda na realização dos ensaios de laboratório, nomeadamente, no ensaio de friabilidade e no ensaio PLT;
- Ao director do laboratório de Geotecnia e materiais de construção, professor José Augusto Fernandes, pela possibilidade concedida para utilizar o laboratório de mecânica dos solos;
- Ao director do laboratório de Mecânica das Rochas do Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico, em Lisboa, pela possibilidade concedida para utilizar o laboratório;
- Ao Engº Pedro Baptista (Orica), pelo acompanhamento na realização do Ensaio Boretrak e disponibilidade de meios técnicos para a compilação dos ensaios de campo;
- Ao Engº Sérgio Moreira (SecilBritas), pela disponibilidade e pela partilha de documentação sobre a pedra de V.N. de Famalicão;
- À Empresa Secil-Britas, S.A., pela oportunidade da realização do trabalho de campo na pedra de V.N. de Famalicão.

A todos, sem excepção, o meu Muito Obrigado!

Palavras-chave

Geomecânica, Maciço Rochoso, Desvios de perfuração

Resumo

Uma das operações envolvidas no desmonte de maciços rochosos é a perfuração. A forma como esta é executada é determinante para o sucesso do desmonte. Quando realizada correctamente o desmonte produz uma boa fragmentação, reduzindo a sobrecavação. Assim, a correcta escolha das ferramentas de perfuração assume um papel preponderante para os custos do desmonte em maciço rochosos. Esta dissertação irá centrar-se nos parâmetros Geológicos, Geotécnicos e Geomecânicos e nos desvios de perfuração. O objectivo geral deste trabalho é perceber a interdependência dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso com os desvios de perfuração, bem como estudar os ângulos de intersecção entre os furos e as descontinuidades que originam o desvio. O estudo dos parâmetros do maciço rochoso aliado a uma perfuração alinhada é salientado com o intuito de uma abordagem de geoengenharia integrada dos maciços rochosos.

Keywords

Geomechanics, Rock Masses, Drilling Deviations

Abstract

One of the operations involved in the rock masses blast is drilling. The way this is implemented is crucial to the success of the blasting. When performed correctly the stoping produces a good fragmentation, reducing the overbreaking. Thus, the correct choice of drilling tools plays a key role for the costs of stoping in massive rock. This dissertation will focus on Geological, Geotechnical and Geomechanical parameters, as well as drilling deviations. The general objective of this work is to realize the interdependence of geological and geotechnical parameters and geomechanical rock mass with drilling deviations, as well as studying the angles of intersection between the hole and the discontinuity that justify the deviation. The study of the parameters of rock mass combined with a drilling line is emphasized in order to approach geo-engineering integrated into the rock mass.

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1. ÂMBITO.....	17
1.2. ENQUADRAMENTO	17
1.3. OBJETIVOS	18
1.4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
2. CARACTERIZAÇÃO E DESMONTE DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	25
2.1. INTRODUÇÃO.....	25
2.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
2.3. DESCRIÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	30
2.3.1. NOÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO.....	30
2.4. METODOLOGIA E SISTEMÁTICA	31
2.4.1. PARÂMETROS ESSENCIAIS NA CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	32
2.4.2. DESCRIÇÃO E ZONAMENTO DO AFLORAMENTO	34
2.5. CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ ROCHOSA	35
2.6. DESCRIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	36
2.6.1. CONCEITO.....	36
2.6.2. TIPOS DE DESCONTINUIDADES.....	37
2.7. PARÂMETROS DO MACIÇO ROCHOSO	42
2.7.1. ATITUDE GEOLÓGICA	43
2.7.2. GRAU DE ALTERAÇÃO	45
2.7.3. FRACTURAÇÃO.....	45
2.7.4. ABERTURA	47
2.7.5. PREENCHIMENTO OU ENCHIMENTO	48
2.7.6. RUGOSIDADE	49
2.7.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	50
2.7.8. CONTINUIDADE.....	51
2.7.9. TERMINAÇÃO.....	52
2.7.10. CURVATURA.....	52
2.7.11. PERCOLAÇÃO DE ÁGUA.....	52
2.7.12. CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO.....	53
2.7.13. TÉCNICA DE AMOSTRAGEM LINEAR APLICADA A SUPERFÍCIES DE DESCONTINUIDADES	57

2.7.14.	ESCLERÓMETRO PORTÁTIL.....	61
2.7.15.	ENSAIO DE CARGA PONTUAL (POINT LOAD TEST, PLT)	64
2.7.16.	ENSAIO DE DESGASTE DE “LOS ANGELES”	69
2.7.17.	ENSAIO DE PERFURABILIDADE.....	72
2.7.18.	FRIABILIDADE-BRITTLINESS TEST	73
2.7.19.	DRILLING RATE INDEX (DRI).....	73
2.8.	DESMONTE DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	75
2.8.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	75
2.8.2.	PERFURAÇÃO VS DESVIO.....	79
2.8.3.	TIPOS DE DESVIOS.....	80
2.9.	DESVIO DE PERFURAÇÃO	83
2.9.1.	FERRAMENTAS DE EXECUÇÃO.....	83
2.9.2.	EQUIPAMENTOS DE PERFURAÇÃO	84
2.9.3.	MÉTODOS DE PERFURAÇÃO.....	85
2.9.4.	ACESSÓRIOS DE PERFURAÇÃO	86
2.9.5.	GEOMETRIA DO DIAGRAMA DE FOGO.....	87
2.9.6.	DIÂMETRO DO FURO.....	87
2.9.7.	COMPRIMENTO DO FURO	87
2.9.8.	INCLINAÇÃO DO FURO	88
2.9.9.	OPERADOR	88
2.9.10.	PARÂMETROS DE REGULAÇÃO.....	89
2.9.11.	LIMPEZA DA BANCADA (EMBOQUILHAMENTO)	90
2.9.12.	REGULARIDADE DA BANCADA.....	91
2.9.13.	MEDIÇÃO DOS DESVIOS	92
2.9.14.	MEDIÇÃO POR LASER	94
3.	CASO DE ESTUDO DA PEDREIRA DE CURVIÃ.....	97
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	97
3.2.	ENQUADRAMENTO DA PEDREIRA.....	99
3.3.	DESCRIÇÃO DE MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	101
3.4.	PEDREIRA DE V. N. DE FAMALICÃO	104
3.4.1.	BREVE ANÁLISE DOS PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS.....	104
3.4.2.	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ROCHOSO.....	104
3.4.3.	PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS.....	106
3.4.4.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	142

3.4.5.	ENSAIO DE DESGASTE “LOS ANGELES” E MICRO DEVAL.....	143
3.4.6.	ÍNDICE DE CARGA PONTUAL.....	143
3.4.7.	DRILLING RATE INDEX (DRI).....	146
3.5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	149
3.6.	RESULTADOS.....	152
4.	CONCLUSÕES	163
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169

Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplo da ferramenta informática [SCANGEO BGD] (adaptado de Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011a,b,c).	21
Figura 2 - Exemplo da ferramenta informática [SCHMIDT UCS] (adaptado de Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011a,b,c).	21
Figura 3- a) Equipamento de medição dos desvios [Boretrak] (adaptado de MLD, 2010). B) Exemplo de aplicação da base de dados GeoHole Data (resultados dos desvios de perfuração) (Ramos, 2008).	22
Figura 4 – A posição da mecânica dos solos, mecânica das rochas e a geologia de engenharia, bem como o posicionamento das associações internacionais (ISSMGE; ISRM; IAEG) no contexto da geoengenharia (adaptado Bock, 2006)..	27
Figura 5 – O Ciclo das rochas numa perspectiva das geociências de engenharia: uma visão dinâmica da formação das rochas e dos solos, donde se destaca o posicionamento da mecânica das rochas e da mecânica dos solos (inspirado em Dobereiner & Freitas 1986). In: Galiza et al. (2011b).	28
Figura 6 – Equipamento de campo básico para o levantamento das discontinuidades pela técnica de amostragem linear aplicada a estudos geotécnicos e geomecânicos (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	33
Figura 7 – Em A, B e C apresentam-se 3 modos fundamentais de geração de diaclases de origem tectónica, em A abertura perpendicular às paredes das superfícies de diaclases, em B deslizamento segundo uma direcção paralela à superfície de deslizamento e perpendicular à frente da fracturação, em C movimento “em tesoura” paralelo à superfície de diaclasamento e à frente da fracturação (Mandl, 2005).	36
Figura 8 – Exemplo de diaclases em rocha argilitica (Gonzalez de Vallejo et al., 2002).	38
Figura 9 – Principais tipos de discontinuidades num maciço magmático (Sodré Borges, 2002). 1) Diaclases cruzadas; 2) Diaclases diagonais; 3) Diaclases sub-horizontais; 4) Diaclases longitudinais.	38
Figura 10 – Tipos de falhas e seus elementos. a) Falha Inversa; b) Falha Normal; c) Falhas de deslizamento.	40
Figura 11 – Exemplo de um maciço com uma falha normal (adaptado González de Vallejo et al., 2002).	40
Figura 12 – Superfície de estratificação horizontal num maciço calcário (González de Vallejo et al., 2002).	41

Figura 13 – Planos de xistosidade em relação com os dobramentos. [As setas marcam a direcção de máxima compressão] (adoptado de González de Vallejo et al., 2002).	41
Figura 14 – Exemplo de um Filão.....	42
Figura 15 – Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das discontinuidades (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	43
Figura 16 – Atitude geológica de uma discontinuidade (adaptado de IAEG, 1982).	44
Figura 17 – Diagramas geológico-estruturais produzidos com auxílio de programas geoinformáticos. a) Diagrama de roseta mostra as direcções das discontinuidades medidas. b) Diagrama de contorno estrutural mostrando a distribuição dos pólos das discontinuidades medidas.....	44
Figura 18 – Medição do espaçamento entre discontinuidades (adaptado de Palmstrom, 2005). .	46
Figura 19 – Exemplo da medição do espaçamento entre discontinuidades num maciço rochoso.	47
Figura 20 – Abertura de uma discontinuidade.....	47
Figura 21 – Exemplo de um tipo de enchimento que pode aparecer na abertura das discontinuidades.....	48
Figura 22 – Representação de blocos diagramas esquemáticos da continuidade (adaptado da ISRM, 1978). a) Continua; b) sub-contínua; c) descontínua.....	51
Figura 23 – Representação do número de famílias mediante bloco-diagramas (González de Vallejo et al., 2002).	54
Figura 24 – formas geométricas relacionadas com o padrão da fracturação (Palmstrom, 2001). a) Blocos poliédricos, b) Blocos equidimensionais, c) Blocos prismáticos, d) Blocos tabulares, e) Blocos romboédricos, f) Blocos colunares.	55
Figura 25 – Esquema do levantamento de discontinuidades pela técnica de amostragem linear (adaptado de Brady & Brown, 2004). D – Distancia à origem da fita; L – Semi-comprimento exposto.....	58
Figura 26 – Ficha de levantamento geológico-geomecânico utilizada no trabalho de campo.	59
Figura 27 – Medição da extensão das discontinuidades condicionada pela vegetação.....	60
Figura 28 – Exemplo de um martelo de Schmidt (http://www.proceq.com).	61
Figura 29 – Ábaco de Miller (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	62
Figura 30 – Ficha de levantamento de campo.	63
Figura 31 – Equipamento utilizado na execução do ensaio de Carga Pontual.....	64
Figura 32 – Dimensão e forma dos provetes para o ensaio de carga pontual (Adaptado de ISRM, 1985, 2007).....	65
Figura 33 – Tipos de rotura possíveis de acontecer no ensaio de carga pontual, a) Ensaio válidos; b) Ensaio inválidos (ISRM, 1985, 2007).	66

Figura 34 – Gráfico para o cálculo de Is (50) (adaptado de ISRM 1985, 2007).....	67
Figura 35 – gráfico utilizado na correcção do diâmetro (adaptado de ISRM, 1985, 2007).....	68
Figura 36 – Gráfico utilizado na conversão de Is (50) em resistência à compressão uniaxial (adaptado de ISRM, 1985, 2007).	69
Figura 37 – Máquina de Los Angeles.....	70
Figura 38 – Teste de Sievers (Cortesia do Instituto Superior Técnico/CECEO).....	72
Figura 39 – Ensaio de friabilidade para a obtenção do valor S20.....	73
Figura 40 – Ábaco de avaliação do DRI – “Drilling Rate Index” através do valor de “Brittleness” (S20) e do Valor J de Sievers (SJ), (adaptado de Sandvik-Tamrock, 2009).	74
Figura 41 – Diferentes etapas da indústria extractiva e transformadora de rocha industrial (adaptado de Rock Excavation Handbook, Sandvik/Tamrock 1999).	75
Figura 42 – Conjunto de operações consubstanciadas no processo de produção de agregados, que vão desde o maciço rochoso (Georrecurso) até à obtenção de um produto rochoso final (Agregado Britado) (adaptado de Galiza et al., 2011a,b,c).	76
Figura 43 – Benefícios de um perfuração alinhada (adaptado de Galiza et al., 2011a,b,c).	77
Figura 44 – Análise dos desvios de perfuração (Ramos, 2008).	78
Figura 45 – Consequências dos desvios de perfuração na distribuição do explosivo no volume de maciço rochoso que se pretende desmontar (Sandvik-Tamrock, 2009).	79
Figura 46 – Posicionamento do equipamento de perfuração.	81
Figura 47 – Parâmetros que influenciam os desvios de perfuração.....	83
Figura 48 – Equipamento de perfuração.....	83
Figura 49 – Ângulo de intersecção entre o furo e as descontinuidades do maciço.	88
Figura 50 – Exemplos de bons e maus emboquilhamentos.	90
Figura 51 – Instabilidade do equipamento de perfuração.....	91
Figura 52 – Equipamento Boretrak (http://www.alphageofisica.com.br/mdl/boretrak.htm).	92
Figura 53 – Posicionamento do equipamento Boretrak (http://www.alphageofisica.com.br/mdl/boretrak.htm).	93
Figura 54 – Software utilizado na análise dos desvios de perfuração.	94
Figura 55 – Medição de distâncias a laser.....	94
Figura 56 – Carta geológica da zona em estudo. (adaptado da carta geológica 9-B (Guimarães) – Andrade & Rocha, 1986).	98
Figura 57 – Localização da Pedreira de V.N. de Famalicão.	99
Figura 58 – Vista da pedreira de V.N. de Famalicão.	100
Figura 59 – Visualização do maciço rochoso e da bancada onde se efectuou o estudo.	104
Figura 60 – Granito da pedreira de V.N. de Famalicão.	105

Figura 61 – Localização da zona do estudo (Imagem retirada do Google Earth a 26-08-2013).....	106
Figura 62 – Levantamento geológico-geotécnico em três faces expostas do maciço. A) 1º Painei; B) 2ºPainei; C) 3ºPainei.	106
Figura 63 – 1º Painei.	107
Figura 64 – Diagrama de rosetas do 1ºPainei, com 49 descontinuidades, projectadas em intervalos (pétalas) com 10º de amplitude.	107
Figura 65 – Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 49 descontinuidades medidas no 1º Painei.	108
Figura 66 – Frente da bancada do 2º Painei.....	117
Figura 67 - Diagrama de rosetas do 2ºPainei, com 47 descontinuidades, projectadas em intervalos (pétalas) com 10º de amplitude.	117
Figura 68 - Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 47 descontinuidades medidas no 2º Painei.	118
Figura 69 – Frente da bancada do 3º Painei.....	125
Figura 70 - Diagrama de rosetas do 3ºPainei, com 31 descontinuidades, projectadas em intervalos (pétalas) com 10º de amplitude.	125
Figura 71 - Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 31 descontinuidades medidas no 3º Painei.	126
Figura 72 - Diagrama de rosetas da análise geral, com 127 descontinuidades, projectadas em intervalos (pétalas) com 10º de amplitude.	133
Figura 73 - Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico de 127 descontinuidades.	134
Figura 74 – Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso de V.N. de Famalicão	142
Figura 75 – Amostras (W1) ensaiadas no PLT (3º Painei).	144
Figura 76 – Amostras (W3) ensaiadas no PLT (3º Painei).	144
Figura 77 – Amostras do maciço, ensaiadas no equipamento de perfurabilidade.	147
Figura 78 – Ábaco de avaliação do DRI.	148
Figura 79 - Projecção em planta do desvio no Furo 1, da 1ª Pega, da pedreira da Secil em Famalicão, registado pelo Boretrak no dia 18/03/2013.	150
Figura 80 – Exemplos de desvio lateral (1-Furo nº5 da 1ª Pega; 2- Furo nº9 da 2ª Pega).....	150
Figura 81 - Leituras Boretrak, associadas às leituras laser do 2º Painei.	151
Figura 82 - Leituras Boretrak, associadas às leituras laser do 3º Painei.	152
Figura 83 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 2º Painei.	153
Figura 84 - Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 3º Painei.	153

Figura 85 – Representação da variação do desvio do furo com a inclinação da descontinuidade.	154
Figura 86 - Variação do desvio do furo com a inclinação da descontinuidade, referentes às descontinuidades do 1º quadrante (1-Gradiente do desvio negativo; 2-Gradiente do desvio positivo).....	154
Figura 87 - Variação do desvio do furo com a inclinação da descontinuidade, referentes às descontinuidades do 2º quadrante (1-Gradiente do desvio negativo; 2-Gradiente do desvio positivo).....	155
Figura 88 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 2º Painel (1-Descontinuidade Fechada; 2- Descontinuidade Aberta).	156
Figura 89 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 3º Painel (1-Descontinuidade Fechada; 2- Descontinuidade Aberta).	156
Figura 90 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 2º Painel (1-Descontinuidade sem preenchimento; 2- Descontinuidade preenchida com Material Esmagado; 3-Descontinuidade preenchida por Argila Mole; 4- Descontinuidade preenchida por Argila Dura).	157
Figura 91 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 3º Painel (1-Descontinuidade preenchida com Material Esmagado; 2- Descontinuidade preenchida por Argila Mole; 3- Descontinuidade preenchida por Argila Dura).	158

Índice de Quadros

Quadro 1 – Características e propriedades a observar em campo para a caracterização de maciços rochosos (Ramos, 2008).	33
Quadro 2 – Propriedades da matriz rochosa e métodos para a sua determinação (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	35
Quadro 3 – Tipos de descontinuidades (Adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).	37
Quadro 4 – Descrição dos principais tipos de diaclases em rocha magmática (Sodré Borges, 2002).	39
Quadro 5 – Grau de alteração proposta pela ISRM (1981).	45
Quadro 6 – Grau de fracturação proposta pela ISRM (1978, 1981).	46
Quadro 7 – Abertura de descontinuidades (ISRM, 1978, 1981).	48
Quadro 8 – Classificação e perfis de rugosidade das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).	49
Quadro 9 – Caracterização da resistência à compressão uniaxial (adaptado da ISRM, 1978).	50
Quadro 10 – Descrição da continuidade das descontinuidades (ISRM, 1981).	51
Quadro 11 – Tipos de terminação (adaptado de González de Vallejo et al., 2002; Brady & Brown, 2004).	52
Quadro 12 – Tipos de curvaturas (adaptado de Bieniawski, 1989; Brady & Brown, 2004).	52
Quadro 13 – Diferentes tipos de presença de água (adaptado de Bieniawski, 1989)	53
Quadro 14 – Classificação de maciço rochoso pelo número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1981).	54
Quadro 15 – Classificação do tamanho do bloco a partir do valor do índice volumétrico (ISRM, 1981).	56
Quadro 16 – Classificação de maciços rochosos em função do tamanho e forma dos blocos (ISRM, 1981).	56
Quadro 17 – Classificação do maciço com base na Resistência Simples (ISRM, 1978, 1981).	62
Quadro 18 - Categoria para os valores máximos de Los Angeles (NP EN 12620 (2004)).....	72
Quadro 19 – Erro de posicionamento (adaptado de Ramos, 2008).	80
Quadro 20 – Erro de Emboquilhamento (Adaptado de Ramos, 2008).	81
Quadro 21 – Erro de direcção e inclinação (Adaptado de Ramos, 2008).	82
Quadro 22 – Erro de comprimento e cota (Adaptado de Ramos, 2008).	82
Quadro 23 – Ferramentas utilizadas na execução da perfuração.	84

Quadro 24 – Avaliação do equipamento de perfuração (Adaptado de Ramos, 2008).....	85
Quadro 25 – Avaliação dos acessórios de perfuração (Adaptado de Ramos, 2008).	86
Quadro 26 – Parâmetros da geometria do diagrama de fogo.	87
Quadro 27 – Avaliação do operador.	89
Quadro 28 – avaliação dos parâmetros de regulação.	89
Quadro 29 – Avaliação do Emboquilhamento.	90
Quadro 30 – Avaliação da regularidade da bancada	91
Quadro 31 – Resumo do estudo micropetrográfico das amostras do granito (adaptado de CICCOPN, 2010).	105
Quadro 32 – Síntese dos dados geológico-estruturais do 1ºPainel.....	109
Quadro 33 – Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos do 1º Painel	110
Quadro 34 – Espaçamento médio das descontinuidades do 1º Painel.	112
Quadro 35 – Classificação do tamanho de blocos de material-rocha com base no índice volumétrico (ISRM, 1981).....	113
Quadro 36- Quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos no 1º Painel.....	116
Quadro 37 - Síntese dos dados geológico-estruturais do 2ºPainel.	119
Quadro 38 – Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos do 2º Painel	120
Quadro 39 – Espaçamento médio das descontinuidades do 2º Painel.	122
Quadro 40- Quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos no 2º Painel.....	124
Quadro 41- Síntese dos dados geológico-estruturais do 3ºPainel.	127
Quadro 42 – Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos do 3º Painel	128
Quadro 43 – Espaçamento médio das descontinuidades do 3º Painel.	130
Quadro 44- Quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos no 3º Painel.....	132
Quadro 45 - Síntese dos dados geológico-estruturais da análise geral.	135
Quadro 46 – Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos da análise geral.....	136
Quadro 47 – Espaçamento médio das descontinuidades da análise geral.	138
Quadro 48- Quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos da análise geral.	141
Quadro 49 – Resultados dos ensaios de desgaste “Los Angeles” e Micro Deval.	143
Quadro 50 – Resultados dos ensaios de carga pontual, do maciço são, W1.	145
Quadro 51 – Resultados dos ensaios de carga pontual, do maciço medianamente alterado, W3.	145
Quadro 52 – Dados do ensaio de Perfurabilidade.....	146
Quadro 53 - Dados do ensaio de friabilidade – Brittleness Test	148
Quadro 54 – Valor do gradiente do desvio e percentagem de descontinuidades do 2º e 3º Painel.	156

Quadro 55 - Valor do gradiente do desvio e percentagem de descontinuidades do 2º e 3º Painei.
.....158

Quadro 56 - Valor do gradiente do desvio e percentagem de descontinuidades do 2º e 3º Painei.
.....159

CAPÍTULO I



Mina de ferro a céu aberto no Vale na Serra de Carajás, Brasil

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. ÂMBITO

1.2. ENQUADRAMENTO

1.3. OBJECTIVOS

1.4. MATERIAIS E MÉTODOS

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. ÂMBITO

A presente tese enquadra-se na Unidade Curricular Dissertação/Projecto/Estágio (42 ECTS), do 2º ano, do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) do Instituto Politécnico do Porto (IPP). A elaboração e defesa pública da presente tese, em formato “Dissertação”, são imperativos para a conclusão do 2º ciclo e a consequente obtenção do Grau de Mestre. Por razões de ordem logística e académica, a presente dissertação explora os dados adquiridos em conjunto e complementa a dissertação de mestrado de José Manuel Pinto (2013).

1.2. ENQUADRAMENTO

A evolução da sociedade obriga a uma elevada preocupação económica por parte das empresas. No sector extractivo, há necessidade de melhorar o conhecimento sobre o maciço rochoso e da rocha que o constitui com o objectivo de obter menores custos na sua transformação. Assim, conhecer as características da rocha, tais como a dureza, abrasividade, diaclasamento, xistosidade, etc, é uma mais-valia para atingir o objectivo final de executar um bom desmonte, obtendo uma curva granulométrica ajustada a todas as operações a jusante, reduzindo assim todos os seus custos. Sabendo que o desmonte não é mais do que a operação de destaque de uma porção, mais ou menos representativa, do material rochoso que o constitui (Galiza et al., 2008), é contudo necessário saber que este envolve uma serie de operações para a sua execução, como, por exemplo, a perfuração.

A operação de desmonte envolve três grupos de parâmetros, a saber; i) Geológico-estruturais, geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso; ii) Ferramentas de execução; iii) Geometria do diagrama de fogo (e.g., Persson et al., 1993; Jimeno, 1995; Dinis da Gama, 1995; Holmberg, 2003; Brady & Brown, 2004; Hoek, 2007).

Todo o conhecimento destas variáveis e a compreensão da interacção que possuem entre si ajudarão a perceber de que forma poderão contribuir para os desvios de perfuração. Ao perceber este facto pode-se então melhorar todo o processo de desmonte.

Para se atingir uma boa optimização de cada uma das fases da operação de desmonte com explosivos é necessário o conhecimento prévio do grau de fracturação natural com o intuito de se definir a compartimentação do maciço rochoso, ou seja, a sua caracterização geológico-estrutural e geotécnica (Rocha, 1981; ISRM, 1981; Dinis da gama, 1995). A orientação da frente livre e a direcção de movimentação da pega em relação à direcção da estratificação ou fracturação também influenciam a fragmentação e o rendimento da pega (Galiza et al., 2008).

Este trabalho foi desenvolvido, em duas fases complementares. Como primeira fase, o trabalho de campo, com a recolha, análise e interpretação dos dados para a caracterização geológica-geotécnica e geomecânica do maciço rochoso. Como segunda fase, a realização de ensaios Boretrak (medição dos desvios de perfuração), bem como a recolha dos parâmetros ligados ao diagrama de fogo e acessórios de perfuração para ser possível avaliar os desvios de perfuração.

1.3. OBJETIVOS

A presente tese tem como principal objectivo, perceber a interdependência dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso com os desvios de perfuração, bem como estudar os ângulos de intersecção entre o furo e as descontinuidades que justifiquem o desvio. Contudo, pode-se destacar que todos os objectivos desta tese foram:

- ✓ Reconhecimento geológico, geomorfológico e cartográfico do maciço rochoso da pedreira de V. N. Famalicão;

- ✓ Selecção das áreas de estudo na própria pedreira e georreferenciação topográfica, recorrendo a um GPS de alta-precisão (“Trimble Geoexplorer”), dos vários diagramas de fogo realizados;
- ✓ Caracterização dos parâmetros geológico-geotécnicos nas áreas em estudo, aplicando a técnica de amostragem linear às discontinuidades presentes no maciço para a avaliação do grau de compartimentação e caracterização dos parâmetros geotécnicos - geomecânicos através da aplicação da Basic Geotechnical Description of rock Masses (BGD), proposta pela International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981) e outras recomendações propostas pela ISRM (1978,2007), pela Geological Society Engineering Group Working Party Report (GSE, 1995), pelo Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow (CFCFF, 1996) e pela International Association of Engineering Geology (IAEG, 1981,a,b,c). Para o tratamento dos dados foi utilizada a aplicação informática **ScanGeoData|BGD** (Ramos, 2008; Fonseca, 2008; Fonseca et al., 2010), que permite a fácil compilação e uma rápida interpretação dos dados;
- ✓ Realização de ensaios geomecânicos “in situ”, com a utilização do Esclerómetro portátil ou “martelo de Schmidt” e de ensaios de laboratório, com a execução do ensaio de Carga Pontual ou “Point Load Test” que servirá para avaliar a resistência à compressão do material rochoso e o ensaio de “Los Angeles” que avalia a resistência ao desgaste dos agregados. Para o tratamento dos dados foi utilizada a aplicação informática **SchmidtData|UCS** (Ramos, 2008; Fonseca, 2008), que permite uma fácil e rápida compilação e interpretação dos dados;
- ✓ Identificação de todos os parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos que mais interferem na génese do tipo e gradiente dos desvios de perfuração;
- ✓ Com base na aplicação informática **GeoHole|Data** (Ramos, 2008) foi possível, a partir de todos os parâmetros influentes na génese do tipo e gradiente dos desvios de perfuração, realizar a caracterização da distribuição destes pelas diferentes causas.
- ✓ Estudo da relação entre o tipo de gradiente do desvio da perfuração e o ângulo de intercepção das discontinuidades, assim como de outras propriedades das mesmas que possam influenciar o resultado dos desvios, como por exemplo; abertura, preenchimento rugosidade, entre outras.

1.4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi dividido, essencialmente, em três fases. Na primeira fase, efectuou-se um reconhecimento de campo para definir as limitações cartográficas e geológico-estruturais do maciço em estudo bem como a área envolvente. Nesse reconhecimento, efectuou-se a caracterização das unidades geológicas regionais e/ou locais, a descrição e caracterização das litologias, a cartografia das macro e meso-estruturas, os traços geológico-estruturais gerais do maciço, a identificação das zonas alteradas e cartografia das suas espessuras, a localização das nascentes, etc.

Numa segunda fase do trabalho, efectuou-se a recolha, tratamento, análise e interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos do maciço, seguindo as recomendações da ISRM – International Society for Rock Mechanics (ISRM 1978, 1981, 2007), da GSE – Geological Society Engineering Group Working Party Report (GSE, 1995) e do CFCFF – Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow (CFCFF, 1996). Na definição dos parâmetros geológico-geotécnicos do maciço rochoso e na caracterização das descontinuidades, foi aplicada a técnica de amostragem linear em superfícies expostas do maciço rochoso (ver pormenor da descrição da técnica, em Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Brady & Brown, 2004 e Martins et al., 2006). Para a caracterização da geomecânica do maciço, recorreu-se aos ensaios de compressão uniaxial; esclerómetro portátil ou “martelo de Schmidt”; carga pontual ou “Point Load Test”; resistência à fragmentação ou ensaio de “Los Angeles” (NP EN 1097-2: 2002); resistência ao desgaste por atrito ou ensaio de “Micro-Deval” (NP EN 1097-1; 2002).

A utilização da base de dados ScanGeoData|BGD (Figura 1) e Schmidt|UCS (Figura 2) dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos conduziu à realização do cruzamento de toda a informação permitindo, assim, a interpretação de todos os dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos adquiridos.

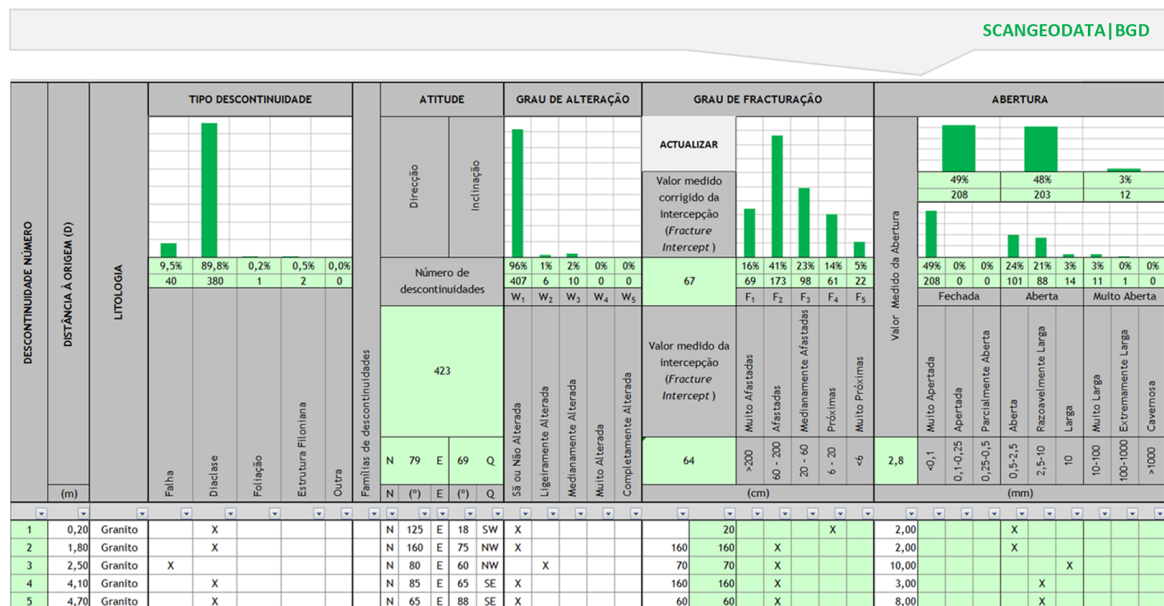


Figura 1 - Exemplo da ferramenta informática [SCANGEODATA|BGD] (adaptado de Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011a,b,c).

[illegible]

Figura 2 - Exemplo da ferramenta informática [SCHMIDT|UCS] (adaptado de Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011a,b,c).

Na terceira fase, destaca-se a realização de ensaios Boretrak (medição dos desvios de perfuração), assim como o registo dos parâmetros do diagrama de fogo, equipamento e acessórios de perfuração. Através da aplicação da base de dados GeoHole|Data (Figura 3), registaram-se os parâmetros geológico-geotécnicos, as ferramentas de execução e a geometria do diagrama de fogo associados aos resultados dos ensaios de perfuração Boretrak.

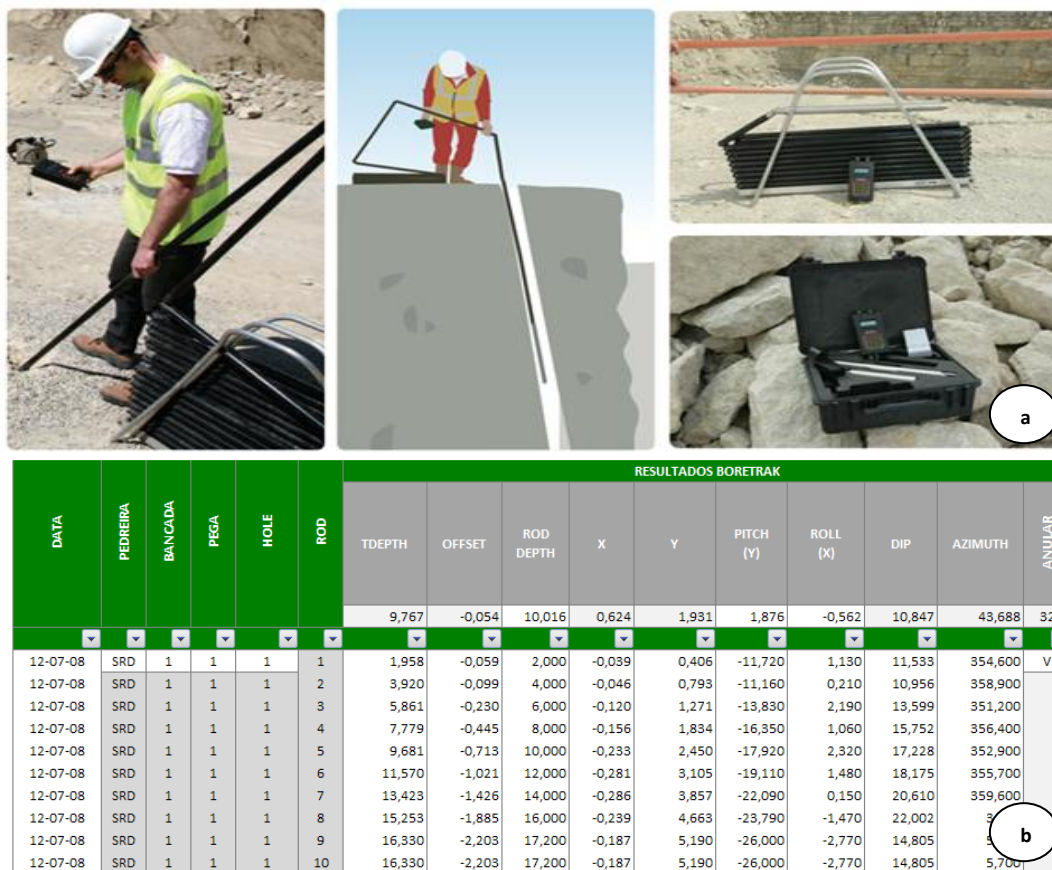


Figura 3- a) Equipamento de medição dos desvios [Boretrak] (adaptado de MLD, 2010). B) Exemplo de aplicação da base de dados GeoHole/Data (resultados dos desvios de perfuração) (Ramos, 2008).

CAPÍTULO II



Mina de diamantes a céu aberto em Sakha, Rússia

2. CARACTERIZAÇÃO E DESMONTE DE MACIÇOS ROCHOSOS

- 2.1. INTRODUÇÃO
- 2.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS
- 2.3. DESCRIÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS
- 2.4. METODOLOGIA E SISTEMÁTICA
- 2.5. CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ ROCHOSA
- 2.6. DESCRIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES
- 2.7. PARÂMETROS DO MACIÇO ROCHOSO
- 2.8. DESMONTE DE MACIÇOS ROCHOSOS
- 2.9. DESVIOS DE PERFURAÇÃO

2. CARACTERIZAÇÃO E DESMONTE DE MACIÇOS ROCHOSOS

2.1. INTRODUÇÃO

Nas Engenharias ligadas às ciências da terra (ou geociências), como Engenharia Geotécnica, Engenharia Geológica, Engenharia de Minas, Engenharia de Recursos geológicos, Engenharia de Recursos Hídricos, entre outras, os profissionais destas áreas estão em permanente contacto com os materiais geológicos (solos e rochas). Estes são considerados materiais naturais, devido principalmente à sua natureza intrínseca e pela diversidade de processos que os originam, apresentam uma grande variedade de características e propriedades.

A complexidade e diferença existente entre os materiais-solos e rochas, originou duas disciplinas científicas distintas, designadas de Mecânica dos Solos e de Mecânica das Rochas (e.g., Mello Mendes, 1967-68; Rocha, 1981; Terzaghi & Peck, 1987; Mandl, 2005; Bock, 2006; Hoek, 2007). As distinções entre cada uma destas temáticas baseiam-se essencialmente, nos métodos de investigação, de classificação, dos ensaios utilizados, de interpretação e de modelação (Figura 4).

O estudo da Mecânica dos solos iniciou-se com a publicação do livro *“Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage”* (Terzaghi, 1925), contudo, verifica-se que na disciplina se incluem hoje considerações científicas notáveis anteriores aos seus trabalhos, como as de Coulomb (1776); Darcy (1856) e Rankine (1857), mas, Karl Terzaghi é unanimemente considerado como o fundador da Mecânica dos Solos. Nos últimos 50 anos, desenvolveu-se a mecânica das rochas, muitos estudiosos contribuíram e desenvolveram uma ampla gama de ferramentas práticas e técnicas (Hoek, 2007). As primeiras publicações foram a de Talobre (1957) titulada *“La Mécanique des roches appliqués aux travaux publics”* e a de Leopold Muller (1963), titulada *“Der Felsbau”*. Posteriormente, Mello Mendes (1967/68) introduz o termo Geomecânica como sendo a

mecânica dos maciços rochosos que compreende o estudo da reologia dos materiais geológicos, nomeadamente daqueles que, na prática, são considerados como rochas e não como solos. O surgimento das Engenharias ligadas às geociências como cursos de graduação da Universidade reconhecidas tem sido um passo importante no desenvolvimento da Mecânica das rochas (Hoek, 2007).

A Geomecânica possui um papel importante no projecto, concepção e execução de trabalhos em que é necessário perceber o comportamento do maciço rochoso nas diferentes obras, como em fundações, barragens, taludes, tuneis, etc. O estudo da mecânica das rochas está interligada com disciplinas como Geologia Estrutural, Cartografia Geológica, Geologia de Engenharia, Hidrogeologia, Mecânica dos Solos, Geofísica aplicada, Mecânica dos materiais e os Métodos Computacionais. Contudo, há autores que defendem que a Geomecânica é uma área científica que interliga a Mecânica das Rochas e a Mecânica dos Solos (Bock, 2006).

A necessidade de explorar os recursos minerais em ambientes desfavoráveis forneceu um impulso significativo à investigação da Geomecânica. Em particular, o crescente aumento da necessidade de executar escavações subterrâneas a cada vez maior profundidade, estimulou a pesquisa para conhecer o desempenho do maciço rochoso sob alta tensão. Por último, a mais recente preocupação com a conservação dos recursos e a segurança industrial reflectiram-se como tentativas para maximizar a recuperação da reserva mineral e o estudo das práticas e técnicas necessárias para manter seguro o trabalho em lugares subterrâneos. Estas preocupações têm resultado em maiores exigências colocadas às empresas de engenharia (Brady & Brown, 2004).

Durante as fases de projecto preliminar, quando existe muito pouca informação sobre o maciço rochoso, o estado de tensão e as características hidrológicas, recorre-se às classificações geomecânicas (Hoek, 2007). É importante compreender as limitações das classificações geomecânicas (Palmström e Broch, 2006) e que o seu uso não faz (e não pode) substituir alguns dos procedimentos de projecto mais elaborados (Hoek, 2007).

É fundamental que o técnico possua um elevado nível de conhecimento das condições do terreno e que garanta que a obra é realizada de acordo com o inicialmente estipulado, no que diz respeito ao tempo e ao custo. Para isso, é necessário um acompanhamento sistemático em todas as fases da obra. Além disso, projectos mal elaborados podem provocar acidentes graves, e certamente custam dinheiro e agravam os prazos inicialmente planeados. Para prevenir tais falhas e acidentes, é necessário previamente realizar um estudo da geologia local a incluir no projecto de uma forma objectiva e clara (Prince, 2009). Assim, em estudos de caracterização geotécnica e geomecânica de maciços fracturados a contribuição da geologia e da geomorfologia é de extrema

importância nas várias fases de qualquer projecto de engenharia de maciços rochosos (e.g., Terzaghi, 1965; Rocha, 1981; Vidal Romaní & Twidale, 1999).

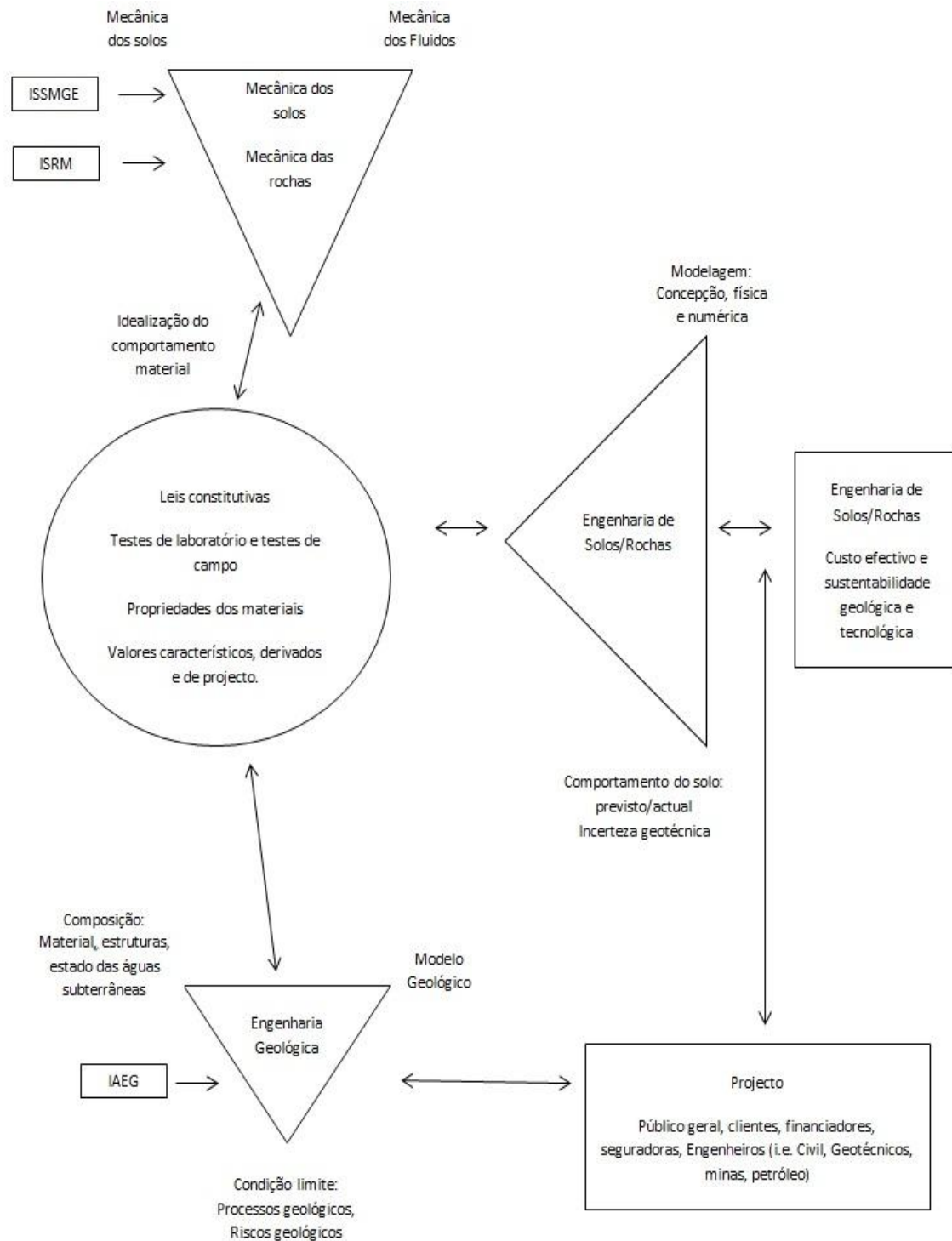


Figura 4 – A posição da mecânica dos solos, mecânica das rochas e a geologia de engenharia, bem como o posicionamento das associações internacionais (ISSMGE; ISRM; IAEG) no contexto da geoengenharia (adaptado Bock, 2006).

2.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A engenharia geológica é uma ciência aplicada ao estudo e à solução dos problemas da engenharia e do meio ambiente produzidos como consequência da intersecção entre as actividades do ser humano e do meio geológico. O objectivo da engenharia geológica é assegurar que os factores geológicos condicionantes pelas obras da engenharia são tidos em conta e interpretados adequadamente, para assim prevenir eventuais riscos geológicos (González de vallejo et al., 2002).

Em geologia, designa-se rocha um agregado natural, formado por um ou mais minerais, que constitui parte essencial da crosta terrestre. De acordo com sua origem, as rochas são divididas em três grupos: Rochas magmáticas ou ígneas, rochas sedimentares e rochas metamórficas (Bell, 2007) (Figura 5).

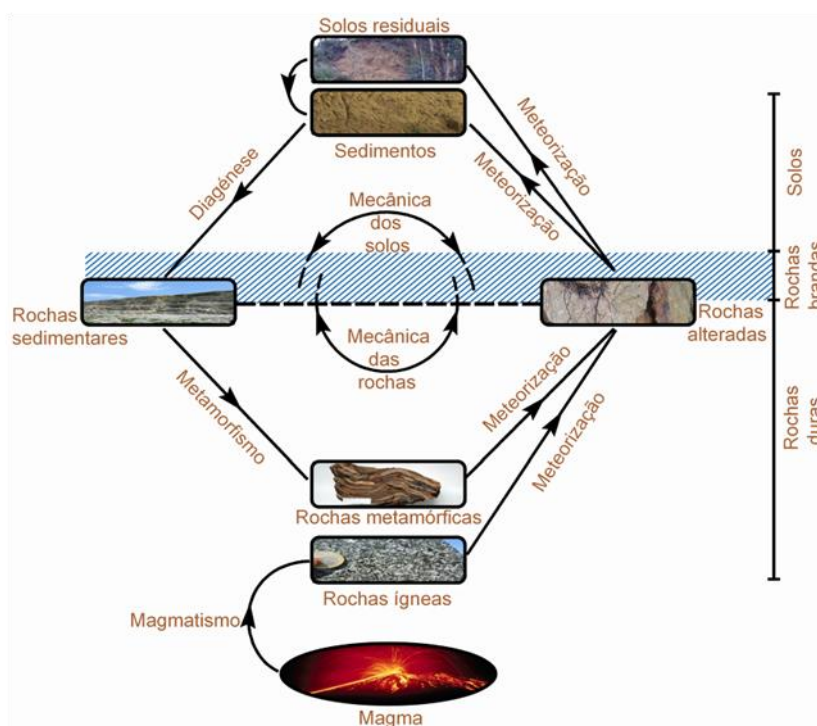


Figura 5 – O Ciclo das rochas numa perspectiva das geociências de engenharia: uma visão dinâmica da formação das rochas e dos solos, donde se destaca o posicionamento da mecânica das rochas e da mecânica dos solos (inspirado em Dobereiner & Freitas 1986). In: Galiza et al. (2011b).

As rochas ígneas são formadas quando o material rochoso se funde e ao solidificar-se forma uma nova rocha. Por sua vez, as rochas metamórficas são originadas de rochas pré-existente, essas rochas alteram-se a nível mineralógicos, texturais e estruturais. Essas alterações são provocadas por mudanças que tiveram lugar nos ambientes físicos e químicos em que as rochas existiram. Alguns minerais são estáveis, mas, em condições limite de temperatura – pressão, existe um

reajuste mineralógico para estabelecer o equilíbrio com o novo ambiente, formando assim uma nova rocha. As rochas sedimentares formam uma camada exterior na crosta terrestre. A maioria das rochas sedimentares é de origem secundária, que consistem em materiais detríticos derivados da desagregação de rochas pré-existentes (Bell, P. G., 2007). As rochas são nitidamente individualizadas porque os minerais se agregam obedecendo a leis físico-químicas, dependendo das condições em que se forma determinado tipo de rocha (Goodman, 1993).

O desenrolar da mecânica das rochas iniciou-se como consequência da utilização do meio geológico para obras superficiais, subterrâneas e exploração de recursos mineiros (González de vallejo et al., 2002). Na mecânica das rochas, uma rocha pode ser considerada como uma parte da geotecnia que reúne todos os estudos teóricos e experimentais destinados a conhecer o comportamento mecânico e hidromecânico das rochas, sendo submetidas a alterações do seu estado de tensões e a condições hidráulicas. Contudo, as características das rochas e do maciço rochoso e o estudo do comportamento mecânico são complexos devido a uma grande variabilidade das características e propriedades que apresentam um elevado número de factores que os condiciona (González de vallejo et al., 2002).

A alteração das rochas através dos agentes climáticos (calor, humidade, gelo), químicos e mecânicos, formam fragmentos e partículas soltas ao qual chamamos solo residual. Assim sendo, define-se solo como todo o agregado natural de partículas minerais separáveis por processos mecânicos de baixa intensidade, como a agitação em água (terzaghi & Peck, 1987). Assim, opõe-se à ideia de rocha, que se considera como um agregado de minerais associados por forças coesivas permanentes constituindo a matriz rochosa. Posto isto, surgiu um novo grupo de materiais naturais que tanto podem ser incluídos no grupo dos solos como no grupo das rochas, sendo designados rochas de baixa resistência ou rocha brandas (Terzaghi & Peck, 1987; González de Vallejo et al., 2002).

A diversidade do meio geológico e a complexidade dos seus processos fazem com que as obras de engenharia devam resolver situações onde os factores geológicos são condicionantes para o projecto. Estabelecida a relação entre os factores geológicos e os factores geotécnicos, e as diferenças entre as condições geotécnicas favoráveis e desfavoráveis, resulta que todo o estudo geotécnico deverá partir do conhecimento geológico, interpretando a geologia para determinar o comportamento do terreno. Assim, o engenheiro deverá conhecer a sequência metodológica, que é definida por três modelos, a saber: o modelo geológico, que representa a distribuição espacial dos materiais, estrutura, tectónica, dados geomorfológicos e hidrogeológicos, entre outros, presentes na área de estudo, o modelo geomecânico representando a caracterização geotécnica e

hidrológica dos materiais e a sua classificação geomecânica e o modelo geotécnico que representa a resposta do terreno durante a construção e depois da mesma. (González de vallejo et al., 2002).

2.3. DESCRIÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A descrição e caracterização da massa em afloramentos de rocha é uma tarefa necessária em todos os estudos de engenharia geológica, cujo objectivo é o conhecimento das propriedades e características geotécnicas dos materiais rochosos. Estes estudos são realizados durante as fases iniciais de investigações “in situ”. Assim sendo, o primeiro passo no estudo de um afloramento de um maciço rochoso deve ser a sua identificação e descrição geral. Posteriormente, realiza-se a divisão em zonas para a sua descrição. É muito útil para fazer desenhos esquemáticos de afloramento, onde se pode indicar as características básicas de cada área (González de vallejo et al., 2002).

O estudo geral do maciço deve incluir a identificação, a descrição das condições gerais do afloramento e a caracterização dos vários aspectos geológico-geotécnicos, i.e., o tipo de litologias e do material-rocha, o estado de alteração, o estudo das descontinuidades e as condições hidrogeológicas. A divisão em zonas geotécnicas mais ou menos homogéneas realiza-se a partir de critérios litológicos, geológico-estruturais e geotécnicos básicos. A descrição de cada zona deve ser a mais objectiva e clara possível, recorrendo-se, a uma terminologia recomendada (e.g., ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; CFCFF, 1996).

O tamanho do bloco é um dos parâmetros importantes para a caracterização do maciço. São as descontinuidades que delineiam os blocos. As suas dimensões e formas são determinadas pelo espaçamento, pela orientação das famílias e pela continuidade. O tamanho de bloco é um parâmetro extremamente importante no comportamento do maciço rochoso (Palmstrom, 2001).

2.3.1. NOÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO

O maciço rochoso pode ser considerado como um meio sólido contínuo separado por planos de fraqueza estrutural, como as superfícies de descontinuidades (Rocha, 1981). O maciço rochoso apresenta uma serie de descontinuidades. Para o estudo do comportamento mecânico do maciço rochoso deve-se estudar as propriedades tanto da matriz rochosa como das suas descontinuidades (González de vallejo et al., 2002).

No estudo do comportamento mecânico das escavações, é fundamental o conhecimento detalhado das propriedades geomecânicas das rochas, bem como das propriedades do maciço rochoso em questão (Brown, 1981; Brady & Brown, 2004; Hoek, 2007). “Os blocos” conferem uma natureza descontínua ao maciço rochoso no que diz respeito as suas propriedades e ao seu comportamento. Além disso, a presença sistemática das descontinuidades com uma determinada orientação, como os planos de estratificação, implica um comportamento anisotrópico. Uma outra característica dos maciços rochosos é a sua heterogeneidade ou variabilidade das propriedades físicas e mecânicas em diferentes zonas do maciço. (González de vallejo et al., 2002).

2.4. METODOLOGIA E SISTEMÁTICA

Nos estudos de Engenharia Geotécnica é fundamental analisar e caracterizar o maciço rochoso, sendo que o principal objectivo é o conhecimento das propriedades e características do maciço. Para isso, é necessário realizar trabalho de campo, que permite avaliar o comportamento geotécnico, bem como adquirir toda a informação sobre o maciço para posteriormente ser analisada e interpretada.

Todas as características do maciço, como a sua localização, persistência e propriedades mecânicas das falhas e de outras fracturas, que ocorram na área de influência do estudo, devem ser definidas, por métodos adequados, de forma objectiva e clara (Brady & Brown, 2004).

Para se obter de uma forma eficaz a descrição geotécnica e o zonamento geotécnico e geomecânico do maciço deve-se ter em conta as seguintes etapas (ISRM, 1987, 1981):

- **Descrição das características gerais do afloramento:** compreende o estudo da geologia estrutural, tipo de descontinuidades, composição mineralógica e textural, grau de alteração.
- **Divisão em zonas e a sua descrição geral:** A divisão em zonas é realizada devido à heterogeneidade do maciço rochoso. Esta divisão é feita após a análise de critérios fundamentalmente litológicos e geológico-estruturais.
- **Descrição pormenorizada de cada zona:** Esta descrição é realizada separadamente e de uma forma detalhada e clara.

- **Descrição dos parâmetros do maciço rochoso:** Compilação e descrição dos parâmetros do maciço rochoso a partir de dados recolhidos em cada zona. A partir desta informação obtém-se o número de famílias de descontinuidades, orientação, entre outras características representativas, determinação do tamanho e forma dos blocos, grau de alteração, etc.
- **Caracterização global e classificação geomecânica do maciço rochoso:** Definir a qualidade e resistência do maciço, através de parâmetros geológico-geotécnicos.

2.4.1. PARÂMETROS ESSENCIAIS NA CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A classificação dos maciços rochosos tem como finalidade a obtenção dos parâmetros geomecânicos para uso na concepção e projecto das obras da engenharia. Os maciços rochosos, como apresentam um comportamento geomecânico complexo devem ser estudados e caracterizados em função do objectivo de utilização. Assim, surgiram as classificações geomecânicas, baseadas na observação directa das características dos maciços rochosos, suportadas pela realização de ensaios simples. As principais características dos maciços rochosos que se consideram nas diferentes classificações são as seguintes: resistência do material rochoso, espaçamento e orientação das descontinuidades, estrutura geológica, presença de água, estado de tensão (González de vallejo et al., 2002).

A International Society for Rock Mechanics [Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas] (ISRM, 1978, 1981, 2007) recomenda que no estudo das descontinuidades se deve atender, principalmente, à determinação das suas principais características tais como, a atitude, o espaçamento, a rugosidade, a abertura e o enchimento ou preenchimento.

No trabalho de campo são imprescindíveis alguns instrumentos para avaliar os parâmetros geológicos e geotécnicos do maciço. Na Figura 6, é apresentado esse equipamento. No Quadro 1, apresentam-se as características e propriedades que se observam e se registam para posterior interpretação.



Figura 6 – Equipamento de campo básico para o levantamento das discontinuidades pela técnica de amostragem linear aplicada a estudos geotécnicos e geomecânicos (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

Quadro 1 – Características e propriedades a observar em campo para a caracterização de maciços rochosos (Ramos, 2008).

Âmbito do estudo	Características ou propriedades	Métodos	Classificação
Matriz Rochosa	Identificação	Observação macroscópica	Classificação geológica e geotécnica
	Meteorização	Observação macroscópica	Índices padronizados
	Resistência	Índices e ensaios de campo	Classificação empíricas de resistência
Descontinuidades	Atitude (Direcção/Inclinação)	Medida directa com a bussola	
	Espaçamento	Medidas de campo	Índices e classificações padronizadas
	Continuidade		
	Rugosidade	Observações e medidas de campo	Comparação com perfis padronizados
	Resistência do maciço	Martelo de Schmidt índices de campo	Classificações empíricas de resistência
	Abertura	Observações e medidas de campo	Índices padronizados
	Percolação		
Maciço Rochoso	Número de famílias de descontinuidades	Medidas de campo	Índices e classificações padronizadas
	Tamanho do bloco		
	Intensidade de fracturação		
	Grau de alteração	Observações de campo	Classificações padronizadas

2.4.2. DESCRIÇÃO E ZONAMENTO DO AFLORAMENTO

No estudo do afloramento de um maciço rochoso deve-se fazer a identificação do mesmo e a sua descrição geral. Posteriormente, faz-se a divisão em zonas e a descrição das mesmas. É fundamental o registo fotográfico e desenhos esquemáticos do afloramento, onde se deverá indicar as características geológico-geotécnicas de cada zona. Em algumas ocasiões, podem existir poucos afloramentos ou estes apresentar pouca extensão, o que dificultará a tarefa do estudo desse maciço. Nestas situações, recomenda-se (Ferrer & González de Vallejo, 1995):

- **Identificação do afloramento:** localização, situação geográfica, acessos, extensão, características geométricas, etc.;
- **Fotografias e esquemas;**
- **Descrição geológica geral:** formação e idade geológica; litologia; estruturas observáveis; zonas alteradas; presença de água, etc.;
- **Divisão em zonas e descrição geral de cada zona:** a divisão das zonas faz-se a partir de critérios litológicos e estruturais considerando os sectores mais ou menos homogêneos do afloramento;
- **Identificação das zonas singulares:** as zonas singulares são zonas com a existência de elementos estruturais não sistemáticos, que não se repetem no maciço e, por isso, tem influência nas suas propriedades e comportamento geomecânico. São exemplos: falhas, filões, cavidades, zonas de fluxo de água, etc. Estas zonas devem ser tratadas e descritas de forma individualizada.

Os mapas geotécnicos incluem informações sobre os materiais geológicos, dados geomorfológicos e hidrológicos, dados quantitativos dos diferentes componentes do meio geológico, das propriedades físicas e mecânicas dos materiais e informação interpretativas para a aplicação geotécnica (IAEG, 1981a,b, 2005).

2.5. CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ ROCHOSA

As rochas são consideradas como sólidos policristalinos, descontínuos e que podem exibir uma certa anisotropia derivada de uma orientação preferencial na sua estrutura (Press & Siever, 1998). Assim, na caracterização da matriz rochosa, deve-se ter em conta os seguintes aspectos: Identificação, meteorização ou alteração e a resistência à compressão simples. A identificação visual de uma rocha faz-se a partir da sua composição e da sua textura. A observação de uma rocha é considerado uma prática corrente bastante útil, pois através desta é possível analisar os seguintes parâmetros: a composição mineralógica, forma e tamanho dos grãos, cor e dureza. Através da composição mineralógica é possível classificar litologicamente a rocha, os minerais mais comuns que formam as rochas são bons identificadores de que rocha se trata (Quadro 2). O grau de meteorização é um parâmetro importante uma vez que condiciona de forma definitiva as suas propriedades mecânicas. Na medida em que se agrava o grau de meteorização, aumenta a porosidade, permeabilidade e deformabilidade do maciço rochoso, diminuindo assim a sua resistência. Por sua vez, a resistência do maciço pode ser estimado a partir de ensaios de campo, como é exemplo, ensaios de carga pontual PLT e o martelo de Schmidt (González de Vallejo et al., 2002).

Quadro 2 – Propriedades da matriz rochosa e métodos para a sua determinação (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

	Propriedades	Métodos de determinação
Propriedades de identificação e classificação	Composição mineralógica	Descrição visual Microscópio óptico e electrónica Difracção de raios x
	Estrutura e textura (petrofábrica)	
	Tamanho do grão	
	Cor	
	Porosidade	Técnicas de laboratório
	Peso específico	
	Humidade	
	Permeabilidade	Ensaio de permeabilidade
	Durabilidade	Ensaio de alterabilidade
	Índice de alterabilidade	
Propriedades mecânicas	Resistência à compressão simples	Ensaio de carga pontual Ensaio de compressão uniaxial Martelo de Schmidt
	Resistência à tracção	Ensaio de tracção directa e indirecta
	Velocidade de ondas sísmicas	Medidas de velocidade de ondas sísmicas
	Resistência	Ensaio de compressão triaxial
	Deformabilidade	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de velocidade sónica

2.6. DESCRIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

2.6.1. CONCEITO

Num maciço rochoso, quando os estratos são deformados, podem ocorrer dobras ou falhas, sendo uma falha uma superfície de descontinuidade ao longo da qual os estratos em ambos os lados foram deslocados em relação um ao outro (Bell, 2007). Em mecânica das rochas é comum o termo descontinuidade como uma designação para descrever a maior parte das superfícies estruturais (tais como, diaclases, falhas, estratificação, xistosidade, etc.) de um dado maciço que demonstrem uma resistência relativamente baixa à tracção (Mello Mendes, 1967-68; Rocha, 1981; ISRM, 1978, 1981).

As superfícies ou planos de descontinuidades dos maciços rochosos condicionam de forma definitiva as propriedades e o comportamento do maciço rochoso ao nível da resistência, deformabilidade e hidráulico. As descontinuidades apresentam um carácter descontínuo e anisotrópico aos maciços, tornando-os mais deformáveis e frágeis na avaliação do seu comportamento. O seu reconhecimento, descrição e caracterização é fundamental para o estudo do comportamento mecânico e hidrogeológico do maciço (González de Vallejo et al., 2002). Stini foi um dos pioneiros da mecânica das rochas que sublinhou a importância do estudo das descontinuidades para controlar o comportamento de maciços rochosos (Müller, 1979). Na figura 7 apresenta-se 3 modos fundamentais de geração de diaclases de origem tectónica.

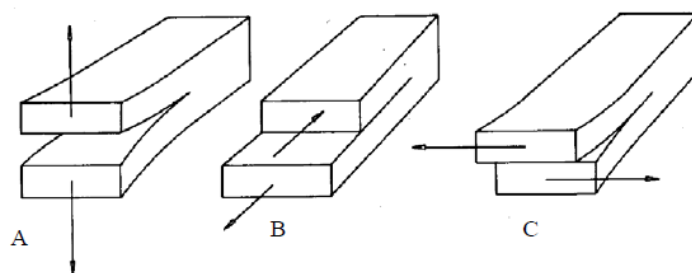


Figura 7 – Em A, B e C apresentam-se 3 modos fundamentais de geração de diaclases de origem tectónica, em A abertura perpendicular às paredes das superfícies de diaclases, em B deslizamento segundo uma direcção paralela à superfície de deslizamento e perpendicular à frente da fracturação, em C movimento “em tesoura” paralelo à superfície de diaclasamento e à frente da fracturação (Mandl, 2005).

2.6.2. TIPOS DE DESCONTINUIDADES

Uma descontinuidade representa um plano de fraqueza dentro de uma massa rochosa em que o material-rocha é estruturalmente descontínuo. As descontinuidades não são, necessariamente, planos de separação, contudo, possuem pouca ou nenhuma resistência à tracção. Variam de pequenas fissuras a enormes falhas. As descontinuidades mais comuns num maciço rochoso são as diaclases, contudo, existem outros tipos de descontinuidades que são planos de estratificação e xistosidade, filões e falhas (Bell, 2007).

No quadro 3, apresentam-se dois grupos de descontinuidades, sendo estas agrupadas em descontinuidades sistemáticas (quando aparecem em família) e em singular (quando aparecem um único plano que atravessa o maciço rochoso).

Quadro 3 – Tipos de descontinuidades (Adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).

Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	<ul style="list-style-type: none"> - Planos de estratificação - Planos de laminação - Planos de xistosidade - Diaclases e fissuras 	<ul style="list-style-type: none"> - Falhas - Filões - Discordâncias estratigráficas
Lineares	<ul style="list-style-type: none"> - Intersecção de descontinuidades planares - Lineações 	<ul style="list-style-type: none"> - Eixos de dobras

➤ **DIACLASES**

As diaclases são planos de descontinuidades que mais frequentemente aparecem num maciço rochoso, e correspondem a superfícies de fracturação ou rotura da rocha em que não houve deslizamento ou tenha sido muito pequeno. Afectam qualquer tipo de rocha. De acordo com a sua origem, pode-se distinguir vários tipos (González de Vallejo et al., 2002):

- **Diaclases de origem tectónica:** associados a dobramentos e a falhas. As diaclases associadas a falhas dispõem-se, na sua maioria, paralelamente à superfície de falha e com uma frequência que diminui com o aumento da distancia à origem da mesma;
- **Diaclases em rochas ígneas:** são originadas por compressão durante ou depois do dobramento do corpo ígneo.

Na Figura 8, apresenta-se um exemplo de um maciço com diaclases. Na Figura 9, apresenta-se os tipos de “Diaclases” mais frequentemente observados num maciço magmático. No quadro 4, apresenta-se as características dessas mesmas fracturas, segundo a mesma orientação.



Figura 8 – Exemplo de diaclases em rocha argilitica (Gonzalez de Vallejo et al., 2002).

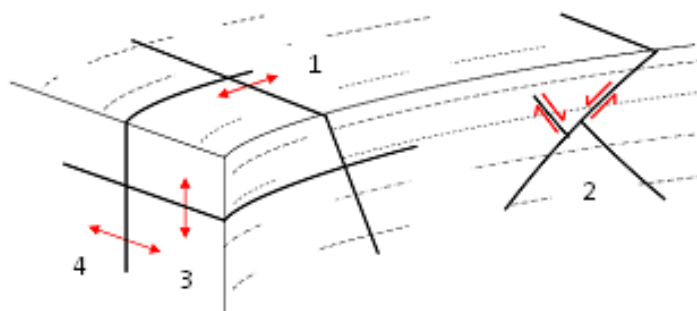


Figura 9 – Principais tipos de descontinuidades num maciço magmático (Sodré Borges, 2002). 1) Diaclases cruzadas; 2) Diaclases diagonais; 3) Diaclases sub-horizontais; 4) Diaclases longitudinais.

Quadro 4 – Descrição dos principais tipos de diaclases em rocha magmática (Sodré Borges, 2002).

Designação	Orientação	Preenchimento	Mecanismo
Diaclases cruzadas	Perpendiculares às linhas de fluxo.	Preenchidas. Com estrias de deslizamento.	Tracção associada ao atrito entre a crusta e o magma fluído e, ainda, à possível expansão da intrusão.
Diaclases diagonais	A 45º, ou mais, das linhas de fluxo.	Preenchidas. Com estrias de deslizamento.	Por corte associado às tracções criadas pelo fluxo: tracção ao longo das linhas de fluxo; compressão, perpendicularmente.
Diaclases sub-horizontais	Sub-horizontais (nas zonas apicais de domos achatados ou em soleiras).	Preenchidas.	Talvez, por tracção resultante da retracção da massa interna da intrusão, ao arrefecer.
Diaclases longitudinais	Paralelas às linhas de fluxo (seguem a sua direcção, mas não o seu mergulho).	Raramente preenchidas. Quando preenchidas contêm minerais estranhos à intrusão.	Por tracção, devido a esforços gerados pelo arrefecimento, associados aos causados pela extensão lateral devido ao levantamento tectónico.

➤ **FALHAS**

Uma falha é uma superfície de fractura, ao longo do qual ocorreu um movimento relativo entre os dois blocos que separa. A superfície de rotura é, frequentemente, plana e é comparável à que se obtém em ensaios laboratoriais de amostras submetidas a tensões compressivas. As falhas podem ocorrer com dimensões muito variáveis: desde falhas observáveis à escala microscópica até as grandes falhas regionais. As falhas correspondem, tipicamente, a uma deformação em regime frágil, que se insere numa gama contínua de possíveis respostas, entre as quais se especificam três situações típicas: o regime dúctil, o regime frágil-dúctil e o regime frágil (Sodré Borges, 2002). As falhas podem ser normais, inversas e de desligamento (Figura 10). Na figura 11, apresenta-se um exemplo de um maciço com uma falha normal.

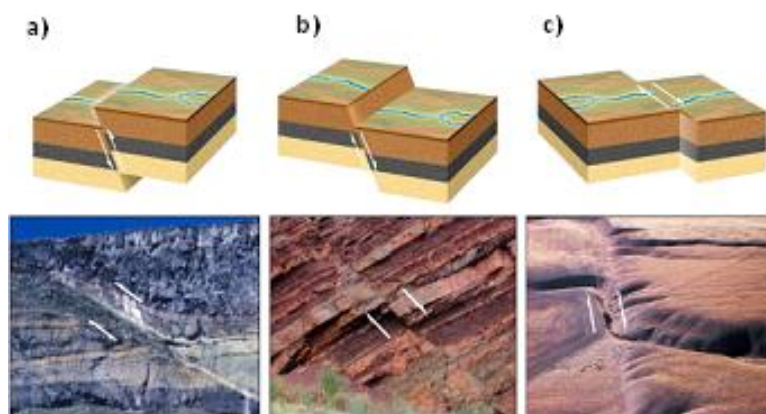


Figura 10 – Tipos de falhas e seus elementos. a) Falha Inversa; b) Falha Normal; c) Falhas de deslizamento.



Figura 11 – Exemplo de um maciço com uma falha normal (adaptado González de Vallejo et al., 2002).

➤ PLANOS DE ESTRATIFICAÇÃO

Os planos de estratificação são superfícies que limitam os estratos das rochas sedimentares. São consideradas discontinuidades sistemáticas com uma continuidade elevada e cujo espaçamento oscila geralmente entre poucos centímetros a vários metros (González de Vallejo et al., 2002). Na Figura 12, podem-se visualizar os planos de estratificação num maciço calcário.

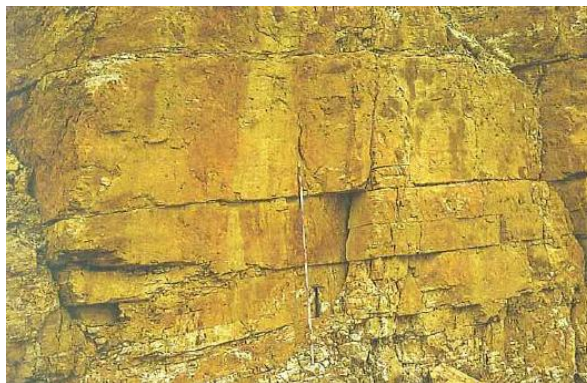


Figura 12 – Superfície de estratificação horizontal num maciço calcário (González de Vallejo et al., 2002).

➤ **PLANOS DE XISTOSIDADE**

Os planos de xistosidade, de origem tectónica, aparecem em rochas que já tenham sofrido uma deformação importante. São descontinuidades geralmente consideradas como perpendiculares à acção de elevadas tensões de compressão afectando formações geológicas (Figura 13). Estas descontinuidades são consideradas sistemáticas e aparecem com maior frequência quanto mais pequena é o grão da rocha (González de Vallejo et al., 2002).

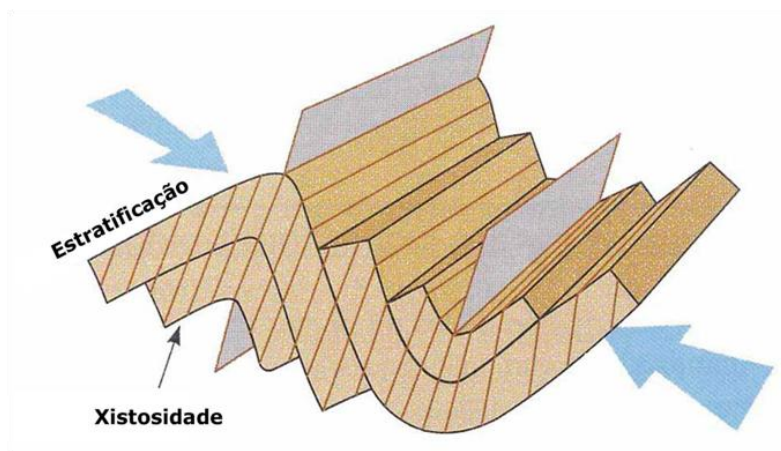


Figura 13 – Planos de xistosidade em relação com os dobramentos. [As setas marcam a direcção de máxima compressão] (adoptado de González de Vallejo et al., 2002).

➤ *FILÕES*

Os filões são corpos magmáticos (Figura 14), de forma tabular, resultantes do preenchimento de fracturas existentes nas rochas. A sua atitude e dimensões são variáveis, podendo apresentar espessuras que variam entre poucos milímetros a alguns metros ou mesmo quilómetros. A sua espessura nem sempre é constante e por vezes ramificam-se.



Figura 14 – Exemplo de um Filão.

2.7. PARÂMETROS DO MACIÇO ROCHOSO

Dependendo da origem e natureza das discontinuidades, as suas características e a sua estrutura podem variar muito. Cada discontinuidade possui a sua própria orientação, tamanho, entre outras propriedades (IAEG, 1982). A resistência ao corte nas discontinuidades é o aspecto mais importante na determinação da resistência dos maciços rochosos fracturados, para a sua avaliação e descrição é necessário definir as características e propriedades dos planos de discontinuidades. A descrição e medição dos parâmetros geológico-geotécnicos de cada família de discontinuidades são realizados, normalmente, no campo. Nesses parâmetros geológico-geotécnicos inclui-se orientação, espaçamento, continuidade ou persistência, rugosidade, resistência das paredes, abertura, enchimento e infiltrações (Figura 15) (González de Vallejo et al., 2002).

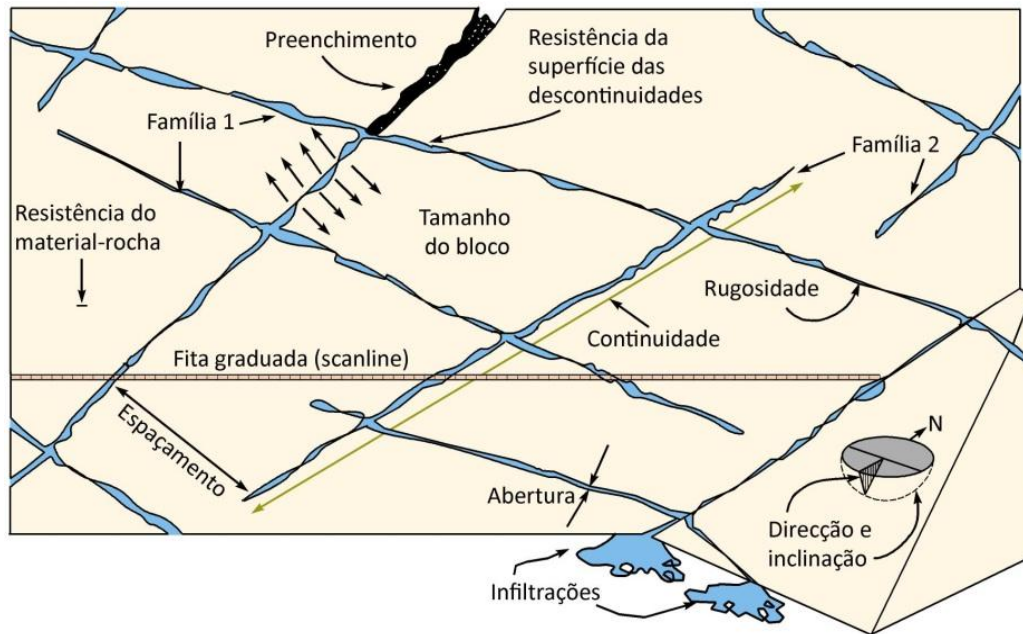


Figura 15 – Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das descontinuidades (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

2.7.1. ATITUDE GEOLÓGICA

As descontinuidades aparecem associadas em famílias com orientação e características mais ou menos homogêneas. A orientação relativa e o espaçamento das diferentes famílias de um maciço rochoso definem a forma de blocos existentes no maciço. Considera-se família de descontinuidades ao conjunto de todas as descontinuidades que apresentam idêntica orientação (Rocha, 1981). A orientação de uma descontinuidade é definida por dois parâmetros, a direcção (definida como o ângulo entre uma recta horizontal do plano e o Norte magnético) e a inclinação (definida como a amplitude angular entre a recta de maior declive e o plano horizontal, variando entre 0° e 90°). A medição da orientação das descontinuidades é feita com uma bússola e a inclinação com um inclinómetro (González de Vallejo et al., 2002). Na Figura 16 apresenta-se os parâmetros avaliados na atitude geológica de uma descontinuidade.

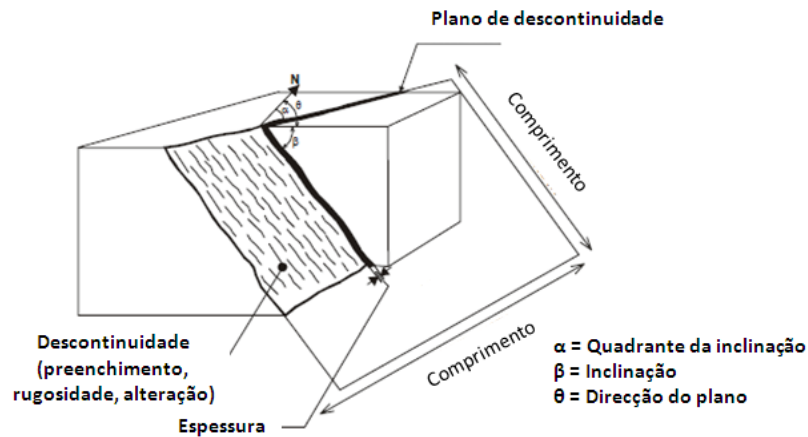


Figura 16 – Atitude geológica de uma descontinuidade (adaptado de IAEG, 1982).

Após a medição das descontinuidades, é efectuado o tratamento estatístico dos dados através de diagramas geológico-estruturais (ISRM, 1978; Hudson & Priest, 1983; Priest, 1993; Lisle & Leyshon, 2004). A representação gráfica da orientação das diferentes famílias de descontinuidades pode-se realizar da seguinte forma (González de Vallejo et al., 2002):

- **Projectão estereográfica**, representa os pólos ou planos com valores médios das diferentes famílias de descontinuidades;
- **Diagrama de rosetas**, permite representar a direcção das famílias de descontinuidades (Figura 17);
- **Símbolos em mapas geológicos**, indicam o valor médio da direcção e o valor de inclinação para os diferentes tipos de descontinuidades.

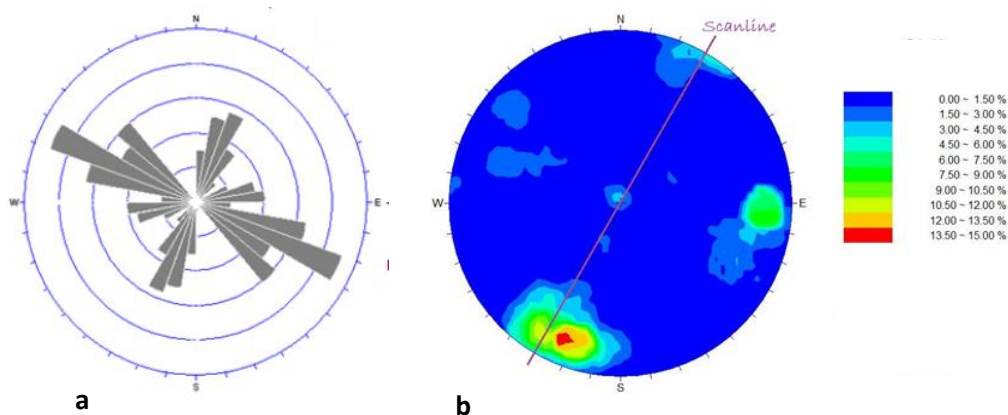


Figura 17 – Diagramas geológico-estruturais produzidos com auxílio de programas geoinformáticos. a) Diagrama de roseta mostra as direcções das descontinuidades medidas. b) Diagrama de contorno estrutural mostrando a distribuição dos pólos das descontinuidades medidas.

2.7.2. GRAU DE ALTERAÇÃO

O estado de alteração é vulgarmente indicado à custa da sua descrição, baseada em métodos expeditos de observação. Em rochas, é costume referir-se à maior ou menor facilidade com que se parte o material, utilizando um martelo de mão, ou a sua coloração e brilho como consequência da alteração de certos minerais como feldspatos e minerais ferromagnesianos. O número de graus a considerar em relação ao estado de alteração de uma dada formação pode variar de autor para autor. Segundo a ISRM (1978,1981) parece adequado considerarem-se cinco graus de alteração dos maciços rochosos. Contudo, em geotecnia (ISRM, 1981), por vezes, utiliza-se uma versão mais simplificada com 3 graus (Quadro 5).

Quadro 5 – Grau de alteração proposta pela ISRM (1981).

Grau de alteração	Nomenclatura	Características	Grau de alteração simplificado	
Sã ou não alterada	W1	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa.	W1-2	Rocha sã a pouco alterada
Ligeiramente alterada	W2	Mudanças na cor original da matriz rochosa. Registrar qual o mineral e o grau de descoloração		
Moderadamente alterada	W3	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original.	W3	Rocha medianamente alterada
Muito alterada	W4	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo. A rocha é muito friável.	W4-5	Rocha muito alterada a decomposta
Completamente alterada	W5	Todo o material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo residual.		

2.7.3. FRACTURAÇÃO

O espaçamento entre os planos de descontinuidades condiciona o tamanho do bloco, logo este parâmetro terá um papel importante no comportamento mecânico do maciço rochoso. O espaçamento é definido como a distância entre os planos de descontinuidade da mesma família, medida na direcção perpendicular a esses planos (González de Vallejo et al., 2002). Contudo, sempre que possível, dever-se-á determinar o grau de fracturação (independentemente das

famílias consideradas) e, o espaçamento entre cada família (ISRM, 1981). A Figura 18 demonstra a proposta da ISRM (1981) para a medição do espaçamento entre descontinuidades.

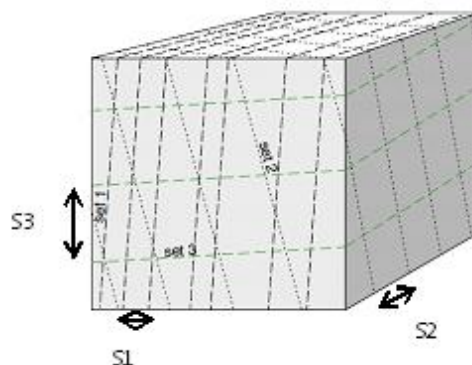


Figura 18 – Medição do espaçamento entre descontinuidades (adaptado de Palmstrom, 2005).

No Quadro 6 é apresentada a proposta da ISRM (1978, 1981), a ser utilizada na caracterização dos maciços em função do espaçamento das descontinuidades. Na Figura 19 apresenta-se um exemplo da medição do espaçamento entre descontinuidades.

Quadro 6 – Grau de fracturação proposta pela ISRM (1978, 1981).

Intervalo (cm)	Nomenclatura	Designação	Nomenclatura simplificada	Designação
>200	F1	Muito Afastadas	F1-2	Afastadas
60-200	F2	Afastadas		
20-60	F3	Medianamente Afastadas	F3	Medianamente Afastadas
6-20	F4	Próximas	F4-5	Próximas
<6	F5	Muito Próximas		



Figura 19 – Exemplo da medição do espaçamento entre descontinuidades num maciço rochoso.

2.7.4. ABERTURA

A abertura é a distância perpendicular que separa as paredes da descontinuidade. Este parâmetro pode ser muito variável em diferentes zonas do mesmo maciço rochoso. A influência da abertura na resistência ao corte de uma descontinuidade é importante, mesmo em descontinuidades fechadas, pois modificam as tensões efectivas que actuam nas paredes das descontinuidades (González de Vallejo et al., 2002). Este parâmetro pode ser medido com uma régua graduada (Figura 20).



Figura 20 – Abertura de uma descontinuidade.

No Quadro 7 é apresentada a proposta da ISRM (1978, 1981), que indica que seja utilizada a seguinte terminologia para a abertura de descontinuidades.

Quadro 7 – Abertura de descontinuidades (ISRM, 1978, 1981).

Abertura (mm)	Descrição	Características
<0,1	Muito Apertada	Fechada
0,1-0,25	Apertada	
0,25-0,5	Parcialmente aberta	
0,5-2,5	Aberta	Aberta
2,5-10	Razoavelmente Larga	
>10	Larga	
10-100	Muito Larga	Muito Aberta
100-1000	Extremamente Larga	
>1000	Caverna	

2.7.5. PREENCHIMENTO OU ENCHIMENTO

É muito habitual que, nas aberturas das descontinuidades, estas apareçam preenchidas por um material diferente daquele de que a rocha é constituída (Figura 21). Existem vários materiais que são encontrados nas aberturas das descontinuidades, sendo que cada material possui propriedades físicas e mecânicas muito diferentes. Sabendo que se trata de materiais brandos ou alterados, estes podem sofrer variações importantes nas suas propriedades resistentes a curto prazo, como tal, é necessário analisar e descrever todos os aspectos referentes as suas propriedades e ao seu estado. As principais características a ter em conta são: a natureza do material, espessura, resistência ao corte e a permeabilidade.

A caracterização física e mecânicas do material de enchimento revela-se de maior interesse, devido a sua permeabilidade e espessura condicionar as características de percolação da água nas descontinuidades.



Figura 21 – Exemplo de um tipo de enchimento que pode aparecer na abertura das descontinuidades.

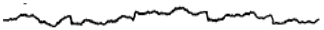








2.7.6. RUGOSIDADE

A rugosidade determina a resistência ao corte, assim, quanto maior for a rugosidade maior será a resistência, quanto maior for a abertura e a espessura do preenchimento, menor a resistência. O termo rugosidade refere-se tanto à ondulação da superfície das descontinuidades como a irregularidade ou rugosidade a pequena escala. A descrição da rugosidade requer, normalmente, duas escalas de observação (González de Vallejo et al., 2002):

- Escala métrica para avaliar a ondulação das descontinuidades, que podem ser: planas, onduladas ou denteadas;
- Escala milimétrica para avaliar a rugosidade ou a irregularidades das descontinuidades, estas podem ser: lisas, rugosas ou muito rugosas.

A rugosidade pode ser medida em campo através de vários métodos, a sua escolha depende da exactidão requerida e/ou da acessibilidade ao afloramento. O método mais usual e rápido é a comparação visual da descontinuidade com perfis padrão de rugosidade que caracterizam qualitativamente as paredes das descontinuidades (Quadro 8).

Quadro 8 – Classificação e perfis de rugosidade das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).

Forma do perfil	Classe	Descrição	Nomenclatura	Esquema
Denteada	I	Muito Rugosa	R4-5	
	II	Rugosa	R3	
	III	Lisa a Algo Rugosa	R1-2	
Ondulada	IV	Muito Rugosa	R4-5	
	V	Rugosa	R3	
	VI	Lisa a Algo Rugosa	R1-2	
Plana	VII	Muito Rugosa	R4-5	
	VIII	Rugosa	R3	
	IX	Lisa a Algo Rugosa	R1-2	

2.7.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência da matriz rochosa pode ser estimada a partir do afloramento mediante índices de campo ou a partir de correlações com dados de ensaio de campo, como o ensaio de carga pontual PLT e o martelo de Schmidt. O índice de campo permite estimar a resistência da rocha. O ensaio da carga pontual permite obter um índice, I_s , que se correlaciona com a resistência à compressão simples. A partir do ensaio com martelo de Schmidt ou esclerómetro portátil é possível medir a resistência que se correlaciona com a resistência à compressão simples. No Quadro 9 apresenta-se a proposta da ISRM (1978) para caracterizar as paredes do material-rocha que limitam a descontinuidade.

Quadro 9 – Caracterização da resistência à compressão uniaxial (adaptado da ISRM, 1978).

Grau (R - Rock)	Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial aproximada (MPa)
R0	Rocha muito fraca	Marcada pela unha do polegar.	0,25-10
R1	Rocha fraca (I)	Fragmentada com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo. Pode ser cortada em fatias com um canivete.	1-5
R2	Rocha fraca (II)	Pode ser cortada em fatias com um canivete com dificuldade. Marcas superficiais obtidas com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo.	5-25
R3	Rocha razoavelmente resistente	Não pode ser esmigalhada ou cortada em fatias com canivete. Podem-se obter fragmentos de rocha com uma pancada seca com o martelo de geólogo.	25-50
R4	Rocha resistente	Podem-se obter fragmentos dando mais de uma pancada seca com o martelo de geólogo.	50-100
R5	Rocha muito resistente	Para se obterem fragmentos são necessárias muitas pancadas com o martelo de geólogo.	100-250
R6	Rocha extremamente resistente	Apenas se obtêm lascas percutindo com o martelo de geólogo.	>250

2.7.8. CONTINUIDADE

A continuidade ou persistência de um plano de descontinuidade é medida segundo a sua extensão superficial. É um parâmetro de extrema importância mas de difícil quantificação a partir da observação de afloramento. A medição da continuidade é realizada com uma fita métrica. As famílias de descontinuidades podem ser classificadas, segundo a sua continuidade, em: contínuas, sub-contínuas ou descontínuas (Figura 22).

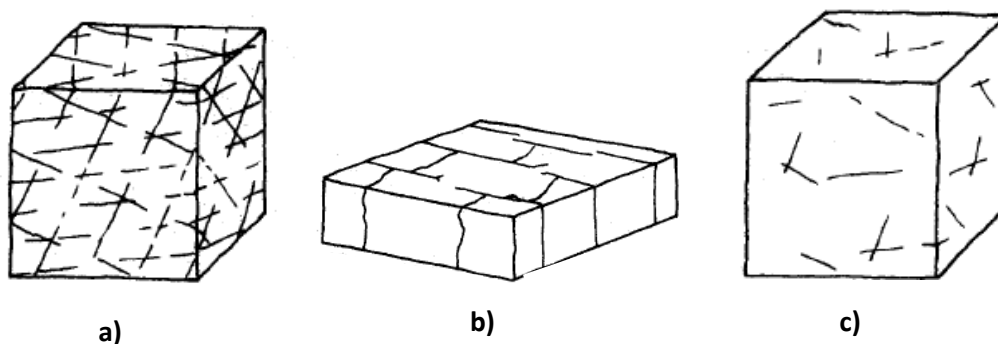


Figura 22 – Representação de blocos diagramas esquemáticos da continuidade (adaptado da ISRM, 1978).
a) Contínua; b) sub-contínua; c) descontínua.

As descontinuidades singulares, como as falhas ou diaclases são, normalmente as mais contínuas, por isso devem ser analisadas com especial atenção. A ISRM (1981) introduziu o conceito de persistência, para traduzir o comprimento da descontinuidade e estabeleceu cinco termos (Quadro 10).

Quadro 10 – Descrição da continuidade das descontinuidades (ISRM, 1981).

Comprimento (m)	Continuidade
<1	Muito pouco contínuas
1-3	Baixa continuidade
3-10	Continuidade média
10-20	Continuidade elevada
>20	Continuidade muito elevada

2.7.9. TERMINAÇÃO

A terminação, tal como o próprio nome indica, é onde termina a descontinuidade. Um maciço com um elevado número de descontinuidades a terminar noutra descontinuidade, indica que estamos na presença de um maciço mais fracturado, enquanto, se uma descontinuidade terminar em rocha, indica um maciço menos fracturado com descontinuidades pouco extensas. O Quadro 11 apresenta os três tipos de terminações.

Quadro 11 – Tipos de terminação (adaptado de González de Vallejo et al., 2002; Brady & Brown, 2004).

Nomenclatura	Designação	Descrição
R	Rocha	A descontinuidade dissipa-se no maciço rochoso.
D	Descontinuidade	A descontinuidade termina ao interceptar outra descontinuidade.
O	Obscuro	Não se consegue observar a terminação da descontinuidade.

2.7.10. CURVATURA

A curvatura de uma descontinuidade é uma característica geométrica. No Quadro 12 são apresentados os tipos de curvaturas que podem ser analisadas nos maciços rochosos.

Quadro 12 – Tipos de curvaturas (adaptado de Bieniawski, 1989; Brady & Brown, 2004).

Nomenclatura	Designação
C1-2	Superfícies planas a ligeiramente curvas
C3	Superfícies algo curvas a curvas
C4-5	Superfícies muito a extremamente curvas

2.7.11. PERCOLAÇÃO DE ÁGUA

A percolação de água corresponde a água que circula no interior do maciço rochoso, normalmente pelas descontinuidades abertas, embora em algumas rochas permeáveis a água circule pela matriz rochosa. No Quadro 13 apresentam-se três termos para classificar a presença de água no maciço rochoso.

Quadro 13 – Diferentes tipos de presença de água (adaptado de Bieniawski, 1989)

Nomenclatura	Designação
S	Seco
H	Húmido
G	Gotejante
F	Fluxo

2.7.12. CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO

Para a caracterização do maciço rochoso a partir dos dados analisados e registados no estudo do afloramento, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- Descrição da matriz rochosa e das descontinuidades;
- Número e orientação das famílias de descontinuidades;
- Tamanho do bloco e intensidade da fracturação;
- Grau de alteração.

Pode-se definir uma família de descontinuidades como sendo um conjunto de descontinuidades que apresentam a mesma orientação. Contudo, é possível encontrar descontinuidades que não se agrupam nas famílias, ou por serem erráticas ou aleatórias, não possuindo a mesma orientação que as famílias já definidas ou por apresentarem características físicas e mecânicas peculiares (Pereira, 1985). O comportamento mecânico do maciço rochoso e o seu mecanismo de rotura está condicionado pelo número de famílias de descontinuidades. O grau de fracturação e o tamanho dos blocos da matriz rochosa é obtido pelo número de famílias de descontinuidades e pelo espaçamento de cada família. Nos trabalhos de campo dos maciços rochosos devem ser analisadas e registadas todas as famílias presentes. No Quadro 14 apresenta-se, segundo a ISRM (1978), os seguintes nove casos para classificar o tipo de maciço consoante o número de famílias de descontinuidades presente neste.

Quadro 14 – Classificação de maciço rochoso pelo número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1981).

Tipo de maciço rochoso	Número de famílias
I	Maciço compacto, com algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
II	Uma família de descontinuidades.
III	Uma família de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
IV	Duas famílias de descontinuidades.
V	Duas famílias de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
VI	Três famílias de descontinuidades.
VII	Três famílias de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
VIII	Quatro ou mais famílias de descontinuidades.
IX	Maciço rochoso esmagado, com o aspecto idêntico de um solo.

As famílias de descontinuidades podem ser representadas graficamente a partir da construção de bloco-diagramas (Figura 23), assim é possível a visualização espacial da sua orientação relativa e do tamanho e forma dos blocos da matriz rochosa. As descontinuidades, quando dispostas com uma certa regularidade, designam-se por superfícies de compartimentação (Figura 24).

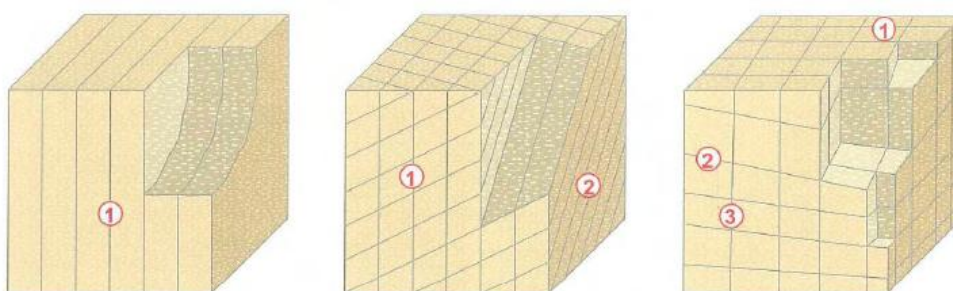


Figura 23 – Representação do número de famílias mediante bloco-diagramas (González de Vallejo et al., 2002).

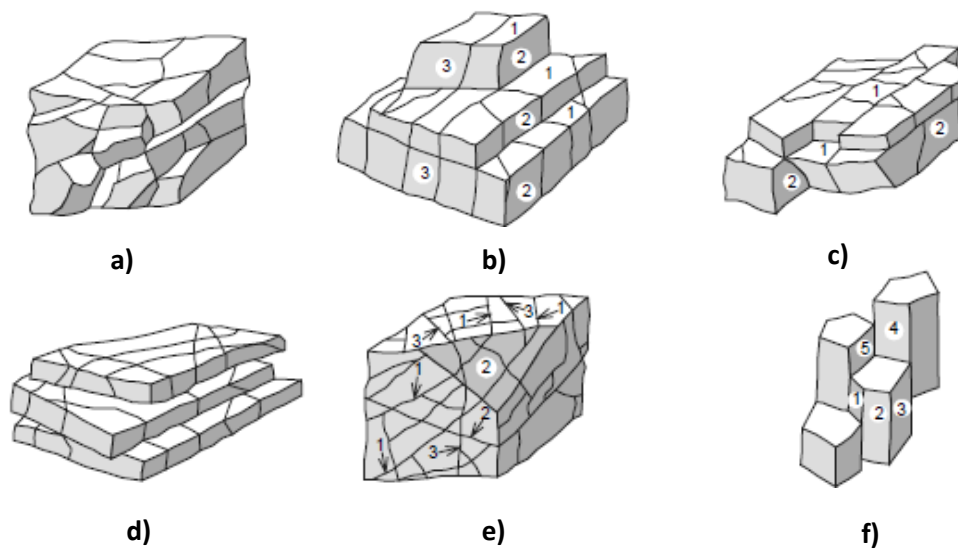


Figura 24 – formas geométricas relacionadas com o padrão da fracturação (Palmstrom, 2001). a) Blocos poliédricos, b) Blocos equidimensionais, c) Blocos prismáticos, d) Blocos tabulares, e) Blocos romboédricos, f) Blocos colunares.

O tamanho dos blocos que formam o maciço rochoso condiciona de forma definitiva o seu comportamento, as suas propriedades resistentes e a sua deformabilidade. A dimensão e a forma dos blocos são definidas pelo número de famílias de descontinuidades, a sua orientação, o seu espaçamento e a sua continuidade. A descrição do tamanho do bloco pode-se realizar da seguinte forma (González de Vallejo et al., 2002):

➤ **Índice Dimensional** – I_b ("Block Size Index"; ISRM, 1978)

O índice dimensional representa as dimensões médias dos blocos medidos no maciço rochoso. Este índice deixa de ter significado para mais de quatro famílias de descontinuidades. Contudo, sabe-se que é pouco utilizado visto ser de difícil determinação e bastante complexo.

➤ **Índice Volumétrico** – J_v ("Volumetric Joint Count"; ISRM, 1978)

O Índice volumétrico representa o número total de descontinuidades que intersectam uma unidade de volume ($1m^3$) do maciço rochoso (ISRM, 1981). Existindo dificuldade em analisar tridimensionalmente um afloramento, pode-se determinar este índice através da contagem de descontinuidades de cada família que intersectam uma longitude determinada, medindo perpendicularmente a direcção de cada uma das famílias (é necessário efectuar um factor de correcção em relação à direcção aparente) (González de Vallejo et al., 2002). Este índice pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$J_v = \frac{n^{\circ} \text{ descontinuidades}}{\text{comprimento}}$$

O comprimento a medir depende do espaçamento de cada família, sendo que o valor varia entre 5 e 10 metros (Palmstrom, 1995; Palmstrom & Singh, 2001). O índice volumétrico também pode ser obtido através da contagem do número total de descontinuidades que intersectam um dado comprimento, correspondendo este valor a uma frequência. Os resultados do índice volumétrico podem ser correlacionáveis com o tamanho dos blocos (Quadro 15). No Quadro 16 apresenta-se uma classificação do maciço rochoso em função da forma, tamanho do bloco e do grau de fracturação.

Quadro 15 – Classificação do tamanho do bloco a partir do valor do índice volumétrico (ISRM, 1981).

Descrição	J_v (descontinuidades/m ³)
Blocos muito grandes	<1
Blocos grandes	1-3
Blocos médios	3-10
Blocos pequenos	10-30
Blocos muito pequenos	>30

Quadro 16 – Classificação de maciços rochosos em função do tamanho e forma dos blocos (ISRM, 1981).

Classe	Tipo	Descrição
I	Compacto	Poucas descontinuidades ou espaçamento muito largo.
II	Cúbico	Blocos aproximadamente equidistantes.
III	Tabular	Blocos com uma dimensão (segundo a horizontal) consideravelmente menor que as outras duas.
IV	Colunar	Blocos com uma dimensão (segunda a vertical) consideravelmente maior que as outras duas.
V	Irregular	Grandes variações no tamanho e forma dos blocos.
VI	Esmagado	Blocos com dimensões bastante pequenas.

➤ Índice RQD

A partir do índice RQD (Rock Quality Designation) é possível avaliar o grau de fracturação. Contudo, este índice não considera aspectos como a orientação, o espaçamento e outros parâmetros das descontinuidades, logo, não é suficiente para avaliar e descrever as características da fracturação do maciço rochoso. É possível estimar o índice RQD a partir de correlações empíricas como a de Palmstrom (1975) (ISRM, 1981):

$$RQD = 115 - 3,3 \times Jv; \text{ para } Jv > 4,5$$

$$RQD = 100; \text{ para } Jv \leq 4,5$$

O valor do RQD também pode ser estimado a partir da frequência das descontinuidades, λ , de acordo com a seguinte expressão:

$$RQD_{min} \approx 100 \exp^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$$

2.7.13. TÉCNICA DE AMOSTRAGEM LINEAR APLICADA A SUPERFÍCIES DE DESCONTINUIDADES

➤ CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A técnica de amostragem linear (*“Scanline Sampling Technique”*) consiste na colocação de uma fita graduada em faces expostas do maciço e no registo de algumas características (geométricas e mecânicas) de todas as descontinuidades por ela intersectadas (Figura 25). Para cada descontinuidade que intersecta a linha de amostragem registam-se as seguintes grandezas:

- D - Distancia à origem;
- L - Semi-comprimento exposto: corresponde ao comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a face exposta da rocha, apenas para um dos lados da fita graduada;
- T – Tipo de terminação que apresenta a extremidade da descontinuidade (podendo ser R - na rocha; D – noutra descontinuidade; O – Obscuro);
- Atitude da descontinuidade (Direcção e inclinação);
- C – Curvatura, numa escala de C1 a C5, em que C1 corresponde superfícies planas e C5 superfícies muito curvas;

- R – Rugosidade, numa escala de R1 a R5, R1 corresponde a uma superfície lisa e R5 uma superfície muito rugosa;
- Abertura;
- Tipo de Preenchimento;
- Presença de água;
- Outras características que se entenda relevante, como por exemplo: Atitude da linha de amostragem; direcção do hasteal (ou talude) em estudo; litologia; grau de alteração; altura da scanline ao solo; data do levantamento; local do estudo.

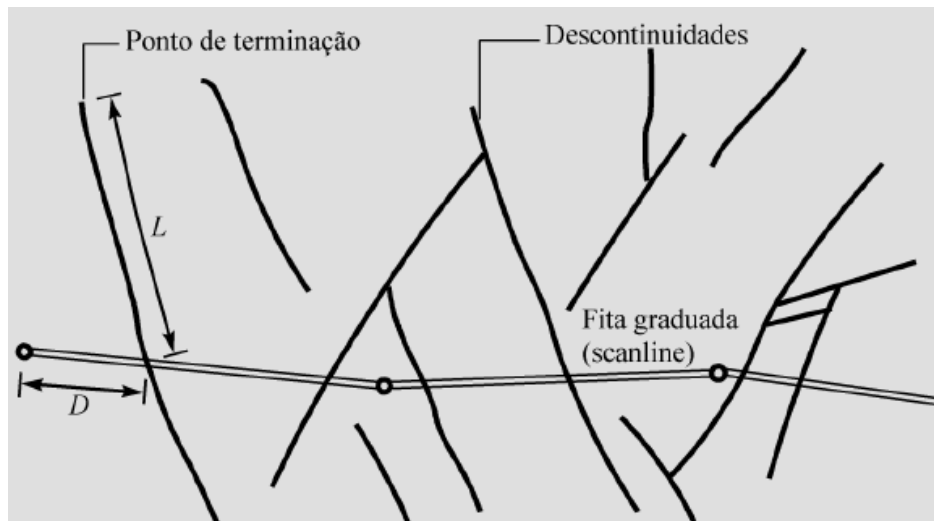


Figura 25 – Esquema do levantamento de descontinuidades pela técnica de amostragem linear (adaptado de Brady & Brown, 2004). D – Distancia à origem da fita; L – Semi-comprimento exposto.

Na Figura 26 apresenta-se a ficha de levantamento geológico-geomecânico utilizado no trabalho de campo, com aplicação da técnica de amostragem linear.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

FICHA DE LEVANTAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO

Técnica de Amostragem Linear (Scanline)

CÓDIGO (ID):

ORIENTAÇÃO:
do estudo: N E
da "Scanline": N E

UNIDADE GEOLÓGICA:

LOCALIZAÇÃO:

SENTIDO:

DATA:

REGIÃO/BAIXADA:

PEDEIRA:

NOME(S):

DISTÂNCIA À ORIGEM (D)	LITOLOGIA	TIPO DECONTINUIDADE	ATITUDE		GRAU DE ALTERAÇÃO W1/W2/W3/W4/W5	GRAU DE FRATURAÇÃO F1/F2/F3/F4/F5	ABERTURA			TIPO DE ENCHIMENTO	RUGOSIDADE			CONTINUIDADE	TERMINAÇÃO		CURVATURA	PRESENCIA DE ÁGUA	OBSERVAÇÕES
			N (°)	E (°)			Q	Valor Medido da Abertura	Fechada		Aberta	Muito	Aberta		Rocha	R D O			
		Falha			Sa ou Não Alterada					Argila Dura	R1	R2	R3	<1	Descontinuidade	Obscuro	Planas e ligeiramente curvas	Muito curvas	
		Folhação			Mediamente Alterada					Quartzito	R1	R2	R3	1-3					
		Estriação fibrosa			Ligeiramente Alterada					Argila mole	R1	R2	R3	3-10					
		Outra			Muito Alterada					Calcário/Milonito	R1	R2	R3	10-20					
					Completamente Alterada					Outro	R1	R2	R3	>20					

Para mais detalhes sobre a metodologia de amostragem linear, consulte o ISEP (1978, 1981, 2007), GSE (1998).

Figura 26 – Ficha de levantamento geológico-geomecânico utilizada no trabalho de campo.

➤ *ESPAÇAMENTO E FREQUÊNCIA DAS DESCONTINUIDADES*

O espaçamento entre descontinuidades da mesma família será calculado pela subtração das distâncias à origem da fita graduada. Priest & Hudson (1981) sugeriram a seguinte expressão para o valor médio do espaçamento:

$$X = \sum x_i / n$$

Sendo, x_i a medida de espaçamento obtido ao longo de uma linha de amostragem de comprimento L e n o valor de espaçamento.

Designa-se frequência das descontinuidades à média do número de descontinuidades levantadas por unidade de comprimento, ao longo de uma linha de amostragem. Para uma amostragem de grande dimensão, $1/X = n/X \cong \lambda$, em que λ representa a frequência média das descontinuidades.

➤ *EXTENSÃO DAS DESCONTINUIDADES*

A extensão das descontinuidades corresponde ao comprimento total de cada descontinuidade. Por vezes, as dimensões das faces expostas de rocha são limitadas, nestes casos apenas se poderão medir os semi-comprimentos até um valor máximo (Figura 27).



Figura 27 – Medição da extensão das descontinuidades condicionada pela vegetação.

2.7.14. ESCLERÓMETRO PORTÁTIL

O martelo de Schmidt foi desenvolvido por E. Schmidt em 1948, para ser aplicado em ensaios in situ, não destrutivos, de dureza do betão (Day and Goudie, 1977; Day, 1980). Hoje em dia, o martelo de Schmidt é muito utilizado no cálculo da resistência das rochas. Este ensaio permite estimar a resistência à compressão simples, sendo aplicada, essencialmente, na matriz rochosa e nas descontinuidades. Este ensaio é muito utilizado devido, fundamentalmente, à sua simplicidade, rapidez e fácil portabilidade (Figura 28).



Figura 28 – Exemplo de um martelo de Schmidt (<http://www.proceq.com>).

Existem vários martelos de Schmidt com diferentes níveis de energia de impacto, sendo que os mais utilizados na determinação das propriedades dos materiais rochosos são: os modelos L e N. O tipo N tem uma energia de impacto de 10 a 70 N/mm², sendo mais utilizado no estudo de betões. O tipo L tem uma energia três vezes mais baixa que o do tipo N de 0,735 N/mm² e é mais utilizado no estudo de maciços rochosos.

O martelo de Schmidt permite avaliar a resistência à compressão simples, ou seja, a dureza do material rocha. O ensaio consiste na medição do ressalto de uma massa de aço quando percutida sobre a superfície da rocha. Em função da dureza da rocha, a massa de aço sofre um maior ou menor ressalto (“Rebound”, R); o valor é registado no aparelho, numa escala de 10 a 100. Por norma, registam-se 10 percussões com o martelo (ISRM, 1981) e eliminam-se os cinco valores mais baixos, sendo que o valor a considerar é a média dos cinco valores mais altos. Posteriormente, recorre-se ao ábaco de Miller (Figura 29), para obter a resistência à compressão simples, através da dureza medida com o martelo de Schmidt, a densidade média da rocha e a orientação do martelo. Por fim é possível classificar o maciço a partir do valor da resistência à compressão simples (Quadro 17). Para ser possível realizar o ensaio em boas condições, é necessário efectuar uma limpeza do local, bem como verificar se não existem fissuras no maciço.

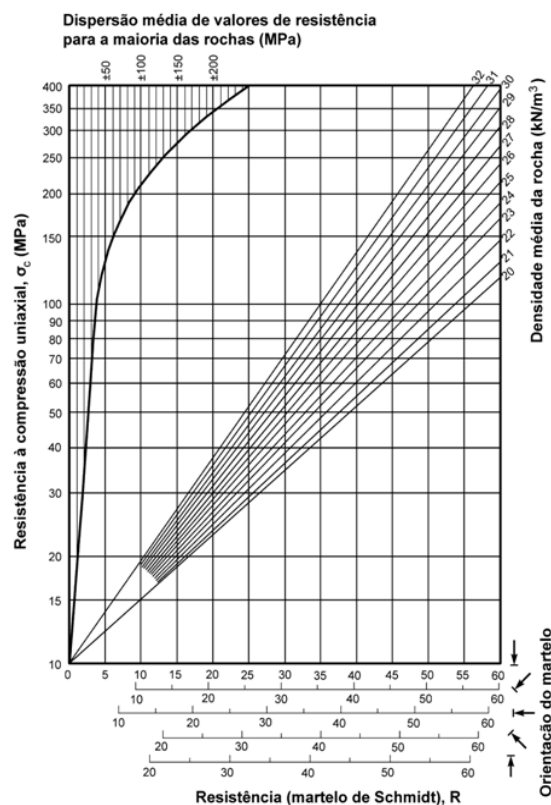


Figura 29 – Ábaco de Miller (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Quadro 17 – Classificação do maciço com base na Resistência Simples (ISRM, 1978, 1981).

Classificação	Resistência à compressão simples (MPa)	Designação	Nomenclatura simplificada
S1	>200	Muito elevada	S1-2
S2	60-200	Elevada	
S3	20-60	Média	S3
S4	6-20	Baixa	S4-5
S5	<6	Muito Baixa	

Os dados obtidos no trabalho de campo são registados na ficha de levantamento geomecânico (Figura 30).

[illegible]

Figura 30 – Ficha de levantamento de campo.

2.7.15. ENSAIO DE CARGA PONTUAL (POINT LOAD TEST, PLT)

➤ OBJECTIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO

O ensaio de Carga Pontual é um método utilizado para a avaliação da resistência das rochas mediante a determinação de um índice que é correlacionável com a resistência à compressão uniaxial entre outros índices de resistência. Através deste ensaio, é possível determinar dois índices: o índice de resistência da carga pontual (I_s (50)) e o índice de anisotropia (I_a (50)). O método consiste, basicamente, em levar à rotura as amostras de rocha através da aplicação de uma carga centrada.

➤ EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado para a realização do ensaio consiste num sistema de aplicação de carga, um sistema de medição da força e um sistema de medição da distância entre as ponteiras, através das quais é aplicada a carga (Figura 31).



Figura 31 – Equipamento utilizado na execução do ensaio de Carga Pontual.

Tanto no sistema de medição de carga como no sistema de medição da distância entre ponteiras deve possuir uma precisão de $\pm 2\%$. O sistema de carga deve ser capaz de romper os provetes das amostras de rocha com resistência semelhantes a 50KN e que permita o ensaio em provetes de tamanho variável que podem ir desde os 15 aos 100 mm. Para que o ensaio seja credível é imprescindível que o equipamento esteja calibrado. Para isso, é necessário que este seja calibrado periodicamente por meio de um certificado independentemente da carga celular e por um conjunto de blocos de deslocamento, P e D e leituras ao longo de toda a gama de cargas e deslocamentos pertinentes nos ensaios.

➤ PROCEDIMENTO DO ENSAIO

De acordo com as características da forma do provete, o eixo escolhido para a aplicação da força, o tipo de rocha a ensaiar e a maior ou menor anisotropia, define-se o tipo de ensaio a efectuar. Posto isto, podem admitir-se três tipos de ensaio (Figura 32).

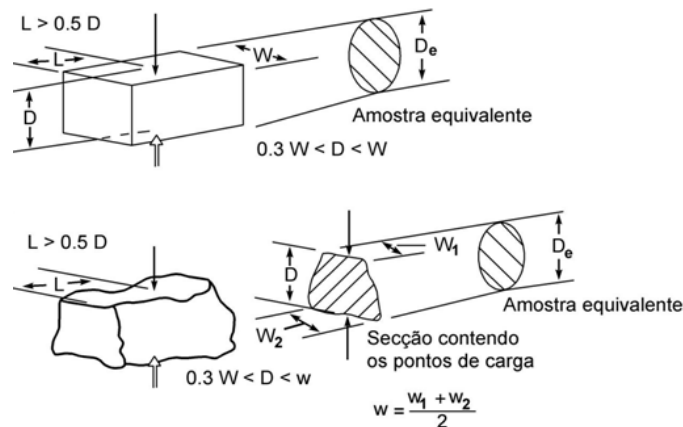


Figura 32 – Dimensão e forma dos provetes para o ensaio de carga pontual (Adaptado de ISRM, 1985, 2007).

➤ ENSAIO DIAMETRAL

Este ensaio é realizado com provetes cilíndricos cuja relação comprimento/diâmetro é superior a 1. O ensaio deve ser realizado em, pelo menos, 10 provetes por amostra em rochas homogéneas e mais de 10 ensaios em rochas anisotrópicas ou heterogéneas. A amostra deve ser colocada na máquina de ensaio de modo a que a distância entre os pontos de contacto e a extremidade livre mais próximo seja pelo menos 0,5 vezes o diâmetro do provete. Por fim, anota-se o valor da distância entre ponteiros D e o valor da carga de rotura P . Todos os provetes cuja superfície de rotura não passe pelos dois pontos de contacto, devem ser rejeitados.

➤ ENSAIO AXIAL

Este ensaio é realizado com provetes cilíndricos cuja relação comprimento/diâmetro varia entre 0,3 e 1,0. O ensaio deve ser realizado em, pelo menos, 10 provetes por amostra em rochas homogéneas e mais de 10 ensaios em rochas anisotrópicas ou heterogéneas. O provete é colocado na máquina de ensaio, de forma que o eixo do ensaio coincida com o eixo perpendicular às faces planas da amostra. No caso de amostras isotrópicas, o eixo de ensaio coincide com o eixo do cilindro, e no caso de amostras anisotrópicas é perpendicular aos planos de descontinuidade. Deve-se anotar o valor da distância entre

ponteiras, D , a largura do provete, W perpendicular à direcção de carga e o valor da carga P . Consideram-se inválidos as amostras que obtiveram superfícies de rotura que passam por um só ponto.

➤ *ENSAIO EM BLOCOS E EM FRAGMENTOS IRREGULARES*

Neste ensaio são utilizados provetes com comprimento entre 50 ± 35 mm e largura entre 0,3 e 1,0. O ensaio deve ser realizado em pelo menos 10 provetes por amostra em rochas homogéneas e mais de 10 ensaios em rochas anisotrópicas ou heterogéneas. A carga deve ser aplicada a uma distância superior a 0,5 vezes a largura do provete. O provete é colocado na máquina de teste devidamente centrado e anotam-se a distância entre ponteiras, D , a menor dimensão do provete, W , perpendicular ao eixo do ensaio e a carga de rotura, P . Se a superfície de rotura passar apenas por um dos pontos de carga, o teste deve ser rejeitado. No caso dos lados do provete não serem paralelos, W , terá de ser calculado através da expressão $W = (w_1 + w_2) / 2$.

Através da Figura 33 é possível visualizar roturas típicas em ensaios válidos e inválidos. Sendo designados ensaios válidos todos os ensaios cuja superfície de rotura contenha os pontos de aplicação da carga e rejeitados os ensaios cuja superfície de rotura passe apenas por um ponto de carga.

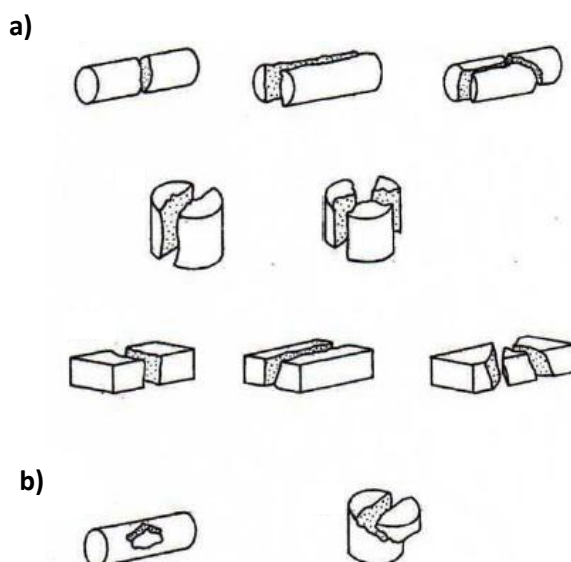


Figura 33 – Tipos de rotura possíveis de acontecer no ensaio de carga pontual, a) Ensaios válidos; b) Ensaio inválidos (ISRM, 1985, 2007).

➤ EXPRESSÃO DOS RESULTADOS

O índice da resistência à carga pontual, I_s , é calculado através da seguinte expressão:

$$I_s = \frac{P}{D^2}$$

Onde:

P – Carga de rotura;

D – Distância entre ponteiras;

O índice de resistência à carga pontual, I_s , é corrigido para $I_s(50)$, ou seja, para o valor correspondente a $D=50\text{mm}$, também é possível obter este valor a partir do gráfico apresentado na Figura 34.

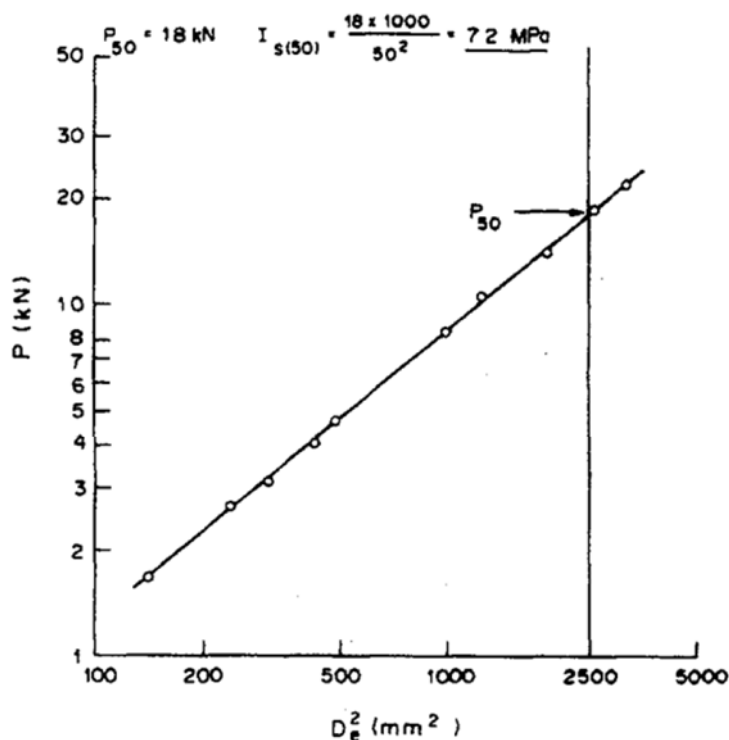


Figura 34 – Gráfico para o cálculo de $I_s(50)$ (adaptado de ISRM 1985, 2007).

Ao projectar os valores de P e D^2 obtidos nos ensaios num diagrama log-log, obtém-se uma recta, através desta é possível extrapolar o valor de P correspondente a $D^2=2500\text{mm}^2$. Através dos valores lidos, determina-se:

$$I_s(50) = \frac{P(50)}{2500}$$

Quando se utilizam amostras de tamanhos únicos, deve-se determinar $I_s(50)$, a partir da seguinte expressão:

$$I_{s\ 50} = F \times I_s$$

Sendo que F corresponde ao factor de correcção, este pode-se obter através do gráfico da Figura 35, ou através da seguinte expressão:

$$F = \frac{De}{50}^{0,45} = \frac{\overline{De}}{50}$$

Em ensaios axiais, em blocos ou em fragmentos irregulares a distância equivalente: $De = 4 \times \frac{A}{\pi}$; a área: $A = W \times D$; Nos ensaios diametrais: $D = De$.

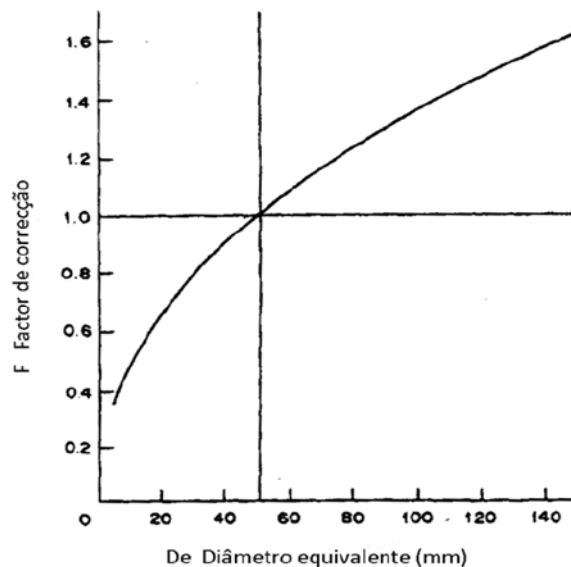


Figura 35 – gráfico utilizado na correcção do diâmetro (adaptado de ISRM, 1985, 2007).

➤ CÁLCULO DO VALOR MÉDIO:

No cálculo do valor médio de $I_s(50)$ deve-se contabilizar o índice de resistência pontual e o de anisotropia. Para o cálculo do valor representativo da resistência à carga pontual, retira-se os dois valores mais altos e os dois valores mais baixos de 10 ou mais testes válidos. Por fim, faz-se a média dos restantes valores.

➤ *CÁLCULO DO ÍNDICE DE ANISOTROPIA:*

O índice de anisotropia I_a (50) é calculado através da razão entre as medianas dos índices calculados para tensões normais e paralelas aos planos de discontinuidades. Para materiais isotrópicos I_a (50) é próximo de 1, para materiais anisotrópicos os valores são mais elevados.

O valor de I_s (50) deve ser utilizado directamente na classificação das rochas, por outro lado as correlações com a resistência à compressão uniaxial não passam apenas de aproximações. A resistência à compressão uniaxial é cerca de 20 a 25 vezes a resistência à carga pontual (Figura 36).

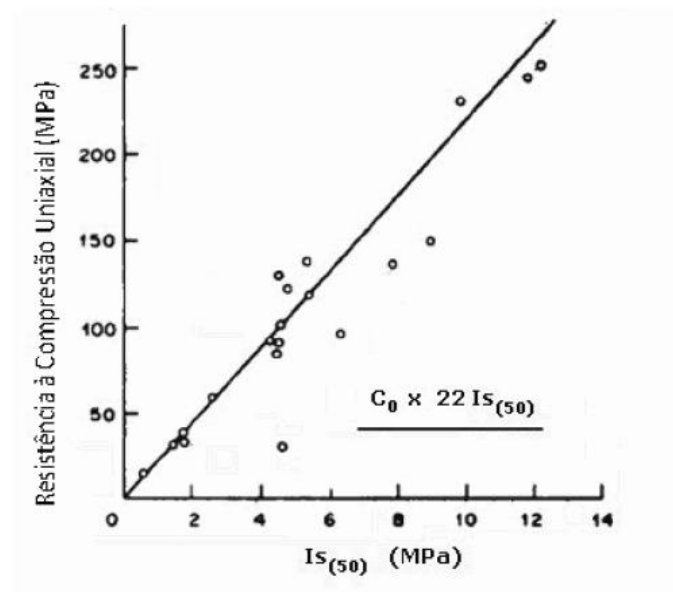


Figura 36 – Gráfico utilizado na conversão de I_s (50) em resistência à compressão uniaxial (adaptado de ISRM, 1985, 2007).

2.7.16. ENSAIO DE DESGASTE DE “LOS ANGELES”

➤ *OBJECTIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO*

O índice de desgaste é facilmente relacionado com a resistência à abrasão por meios mecânicos e com a capacidade resistente dos agregados. Através da norma NP EN1907-2 (2002) é possível analisar o procedimento a adoptar na determinação da resistência ao desgaste dos agregados de densidade normais.

O método consiste, basicamente, na análise granulométrica de um agregado grosseiro. Em que inicialmente, é preparada uma amostra de agregado britado, com 5000g, passadas na fracção 10/14mm de forma a obter uma amostra que será submetida ao ensaio de abrasão na máquina de Los Angeles. Por fim, expressa-se a perda de material ou desgaste, como a percentagem de massa perdida durante o ensaio em relação à massa da amostra inicial.

➤ **EQUIPAMENTO**

O equipamento de Los Angeles utilizado para a realização do ensaio possui um tambor com cerca de 710 ± 6 mm de diâmetro interior e 510 ± 6 mm de comprimento montado horizontalmente sobre umas hastes verticais, no qual uma destas possui um dispositivo que permite o acoplamento de um motor que promoverá a rotação da máquina. Na parte cilíndrica que compõe o equipamento, existe uma abertura para possibilitar a introdução da amostra, que posteriormente é selado com uma tampa que garante o isolamento do conjunto (Figura 37).

Para a realização deste ensaio também são utilizados outros equipamentos, como:

- **Balança**, com uma capacidade superior a 10 ± 1 Kg e uma precisão de cerca 0,1% da massa pesada;
- **Peneiros**, com aberturas de 10 e 14mm e de chapa perfurada e de malha quadrada;
- **Estufa**, capaz de manter uma temperatura constante de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- **Esferas de aço**, constituída por 12 esferas de aço, cada uma com um diâmetro entre 45mm e 49mm e uma massa compreendida entre 440g e 445g (Figura 37).



Figura 37 – Máquina de Los Angeles.

➤ *PROCEDIMENTO DO ENSAIO*

Inicialmente a amostra é previamente preparada, é peneirada e separada pelos peneiros de 10mm, 11,2mm e 14mm. Cada fracção é lavada e seca. Posteriormente, após ter sido arrefecida até á temperatura ambiente, é misturada as várias fracções. A amostra é reduzida à dimensão do provete e pesada com 5000g. É verificado a limpeza do tambor rotativo, posteriormente é colocado a amostra juntamente com 12 esferas, na máquina. O tambor é tapado e colocado em funcionamento, a velocidade de rotação deve ser constante de 33r/min, o equipamento é mantido em movimento até perfazer 500 voltas. Terminada a rotação, esvazia-se o conteúdo do tambor, limpando-o cuidadosamente de modo a evitar perdas de material, sendo retiradas também as esferas. Peneira-se a amostra e pesa-se a fracção retida no peneiro de 1,6 mm.

➤ *EXPRESSÃO DOS RESULTADOS*

O coeficiente de Los Angeles, LA, pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$LA = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100\%$$

Onde:

m_i – massa da amostra inicial;

m_f – massa da amostra retida no peneiro de 1,6mm

A percentagem de perda por desgaste (LA) apresenta-se arredondada ao número inteiro mais próximo. Após a realização do ensaio é possível classificar a amostra segundo o coeficiente de Los Angeles obtido (Quadro 18).

Quadro 18 - Categoria para os valores máximos de Los Angeles (NP EN 12620 (2004)).

Coefficiente de Los Angeles	Categoria LA
≤ 15	LA ₁₅
≤ 20	LA ₂₀
≤ 25	LA ₂₅
≤ 30	LA ₃₀
≤ 35	LA ₃₅
≤ 40	LA ₄₀
≤ 50	LA ₅₀
> 50	LA _{declarado}
Não requerido	LA _{NR}

2.7.17. ENSAIO DE PERFURABILIDADE

O ensaio de Perfurabilidade ou Teste de Sievers consiste em medir a dureza ou a resistência à indentação da rocha, com a vantagem que o ensaio é realizado a partir de uma amostra previamente preparada. O resultado final obtido terá em consideração as interligações entre minerais. O ensaio consiste, basicamente, em submeter uma amostra a uma força vertical de 20Kg e através de uma ferramenta de carboneto de tungsténio com 8,5mm de largura biselada a 110º realizando 200 rotações (Figura 38). O valor SJ expresso em décimas de milímetro, é obtido através da média dos 5 ensaios realizados com amostras pré-cortadas.



Figura 38 – Teste de Sievers (Cortesia do Instituto Superior Técnico/CECEO).

2.7.18. FRIABILIDADE-BRITTLENESS TEST



Figura 39 – Ensaio de friabilidade para a obtenção do valor S20.

O ensaio de Friabilidade pode ser obtido a partir do Brittleness Test (S20), o ensaio consiste na utilização de uma amostra de rocha depois de ser fragmentada no britador, é crivada na fracção 11,2 a 16mm, 0,5Kg de amostra com $2,65 \text{ Kg/dm}^3$. Essa amostra é sujeita a 20 impactos de uma massa de 14Kg que cai a uma altura de 25cm. O valor de S20 é obtido através da média de 3 ensaios, sendo que é contabilizado a percentagem em peso do material abaixo de 11,2mm (Figura 39).

2.7.19. DRILLING RATE INDEX (DRI)

O Drilling Rate Index (DRI) caracteriza a Perfurabilidade do maciço, e tenta replicar o fenómeno da perfuração. O valor de DRI é obtido a partir do valor de Brittleness S20 e o valor SJ de Sievers (Figura 40). A obtenção deste parâmetro surgiu da necessidade de conhecer o comportamento e performances da perfuração, visto que o valor DRI caracteriza o maciço quanto à Perfurabilidade.

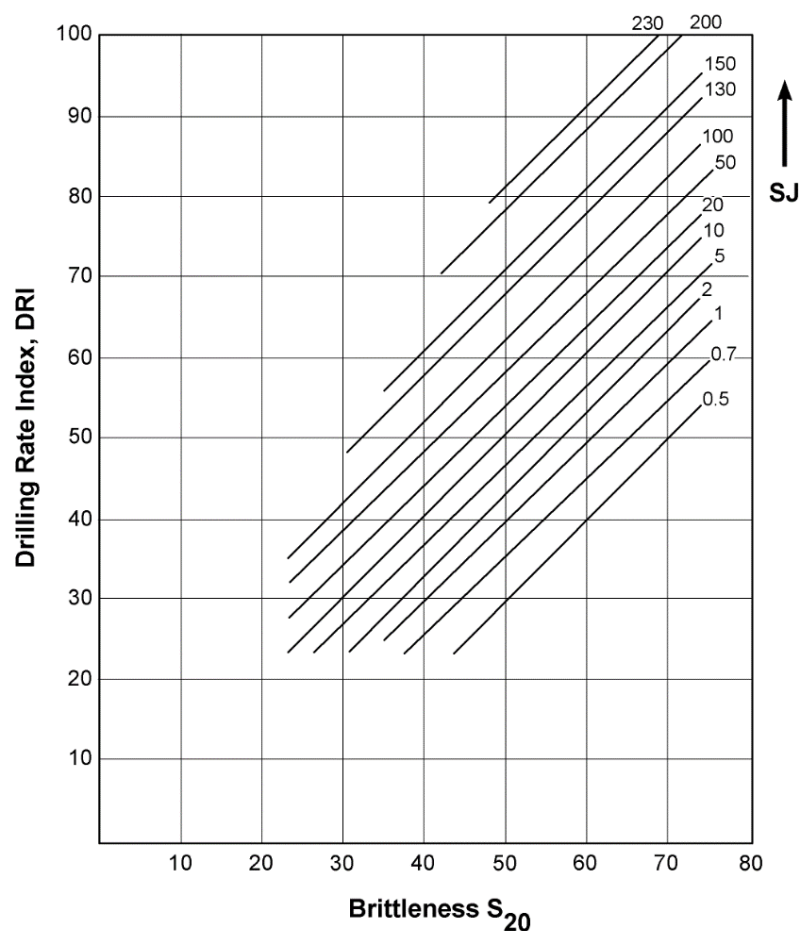


Figura 40 – Ábaco de avaliação do DRI – “Drilling Rate Index” através do valor de “Brittleness” (S_{20}) e do Valor J de Sievers (SJ), (adaptado de Sandvik-Tamrock, 2009).

2.8. DESMONTE DE MACIÇOS ROCHOSOS

2.8.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A perfuração é uma das operações envolvidas na fragmentação de rocha (Olofsson, 2002; Holmberg, 2003). O modo como esta operação é realizada determina o sucesso da fragmentação. A execução correcta desta operação irá permitir uma melhoria nas operações seguintes, nomeadamente no carregamento e detonação, na granulometria obtida após o desmonte, na fragmentação secundária, na carga e transporte e na britagem (Figura 41). A actual necessidade de redução de custos de produção requer a análise de todos os factores económicos envolvidos, e a fragmentação é um dos aspectos mais relevantes na optimização dos custos de produção, devido, essencialmente, aos efeitos directos nos custos da perfuração e detonação, bem como nas restantes operações.

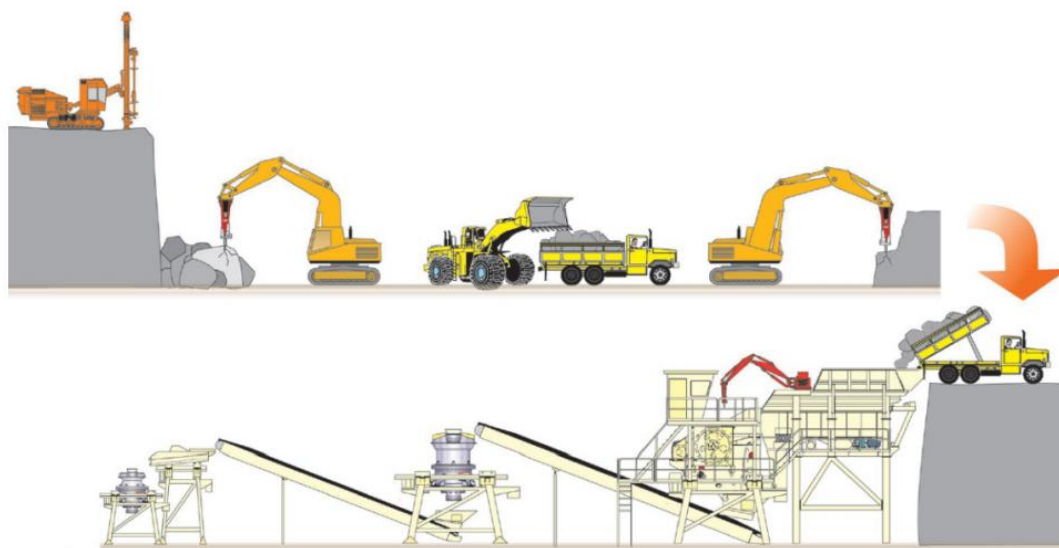


Figura 41 – Diferentes etapas da indústria extractiva e transformadora de rocha industrial (adaptado de *Rock Excavation Handbook*, Sandvik/Tamrock 1999).

Na actualidade, onde voga o conceito de mais oferta que procura, o custo de produção é cada vez mais determinante para se ser competitivo no mercado. A optimização de todas as operações é essencial para a evolução técnico-económico, e como tal deve-se obter, em cada operação, o maior rendimento possível. As percentagens que as principais operações envolvidas representam, no que diz respeito ao custo, não são equitativamente distribuídas (Figura 42).



Figura 42 – Conjunto de operações consubstanciadas no processo de produção de agregados, que vão desde o maciço rochoso (Georrecurso) até à obtenção de um produto rochoso final (Agregado Britado) (adaptado de Galiza et al., 2011a,b,c).

Através da Figura 42 é possível verificar que a operação de britagem é a operação mais representativa, logo à primeira vista torna-se a operação mais atractiva para optimização devido, essencialmente, ao peso que representa. Contudo, é a última do processo de extracção e transformação, significando que a sua rentabilidade depende da qualidade das operações anteriores. A carga e transporte também poderia ser vista como uma operação possível de ser optimizada, igualmente pelo peso que representa nos custos de operação total, contudo, a produtividade desta operação depende do resultado do desmonte, em que uma boa fragmentação perspectiva um bom rendimento em termos de carga e transporte, logo, é completamente dependente das operações anteriores, significando que o seu estudo singular iria obter qualquer tipo de vantagem na optimização. A fragmentação secundária não é mais que uma operação com recurso a meios mecânicos para fragmentar os blocos de maior dimensão que resultaram de um desmonte pouco eficaz. O carregamento e rebentamento possuem um peso pouco significativo, apenas assumem um papel preponderante na rentabilidade de todo processo de transformação. Sendo a perfuração a primeira operação a ser executada e, apesar de representar menor peso no custo de operação, é das que mais influencia a optimização das restantes. Posto isto, a perfuração será a operação mais indicada para o estudo com a finalidade

de se obter uma boa optimização. O primeiro aspecto a ter em conta na perfuração é na execução de uma perfuração o mais alinhado possível (Figura 43).

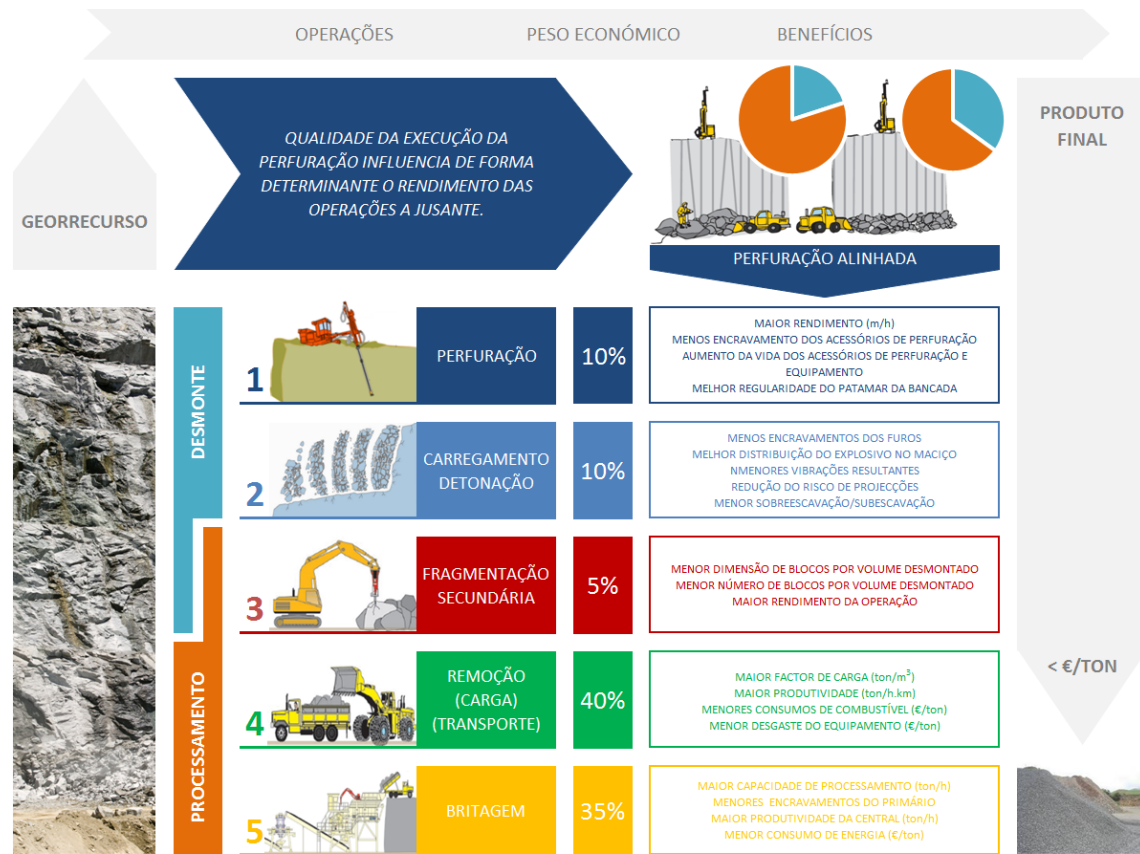


Figura 43 – Benefícios de um perfuração alinhada (adaptado de Galiza et al., 2011a,b,c).

Na optimização da operação de desmonte com explosivos é necessário previamente analisar o grau de fracturação natural, o grau de alteração e a resistência à compressão, com o objectivo de definir a compartimentação do maciço rochoso, ou seja, a caracterização geológico-estrutural e geotécnica do maciço. Na Figura 44 são evidenciados os parâmetros do maciço rochoso sujeito a análise nos desvios de perfuração.

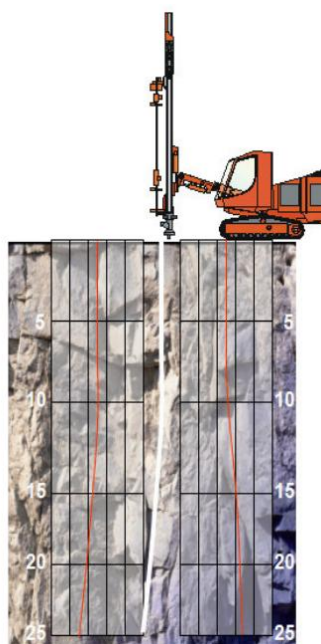


Figura 44 – Análise dos desvios de perfuração (Ramos, 2008).

Langefors & Kihlstrom (1978) tornaram possível, através de fórmulas empíricas, estimar o desvio em função do diâmetro e comprimento do furo, considerando apenas que estes dois factores geométricos têm influencia no desmonte. O desvio expectável durante a perfuração é representado pela seguinte fórmula:

$$F = \frac{d}{1000} + 0,03 \times H$$

Onde:

F – representa o desvio expectável para um determinado comprimento de furo;

H – comprimento de furo;

d – Diâmetro de furação.

Através desta fórmula é possível verificar que o aumento do diâmetro do furo faz aumentar o desvio, contudo, sabe-se que na prática, o que acontece é precisamente o contrário.

2.8.2. PERFURAÇÃO VS DESVIO

Em toda a operação de perfuração sabe-se que, mesmo sem a influência de um qualquer erro humano, todos os furos apresentam desvio, por menor que seja. Posto isto, na vertente da qualidade da execução da perfuração, devem ser avaliados dois aspectos: a posição e a trajetória do furo. Para além de ser importante avaliar a posição em que o furo se encontra ao atingir a cota pretendida, também é importante, avaliar a trajetória que ele segue, para assim, melhor compreender os erros e factores que podem estar na génese do tipo e do gradiente do desvio (Figura 45).

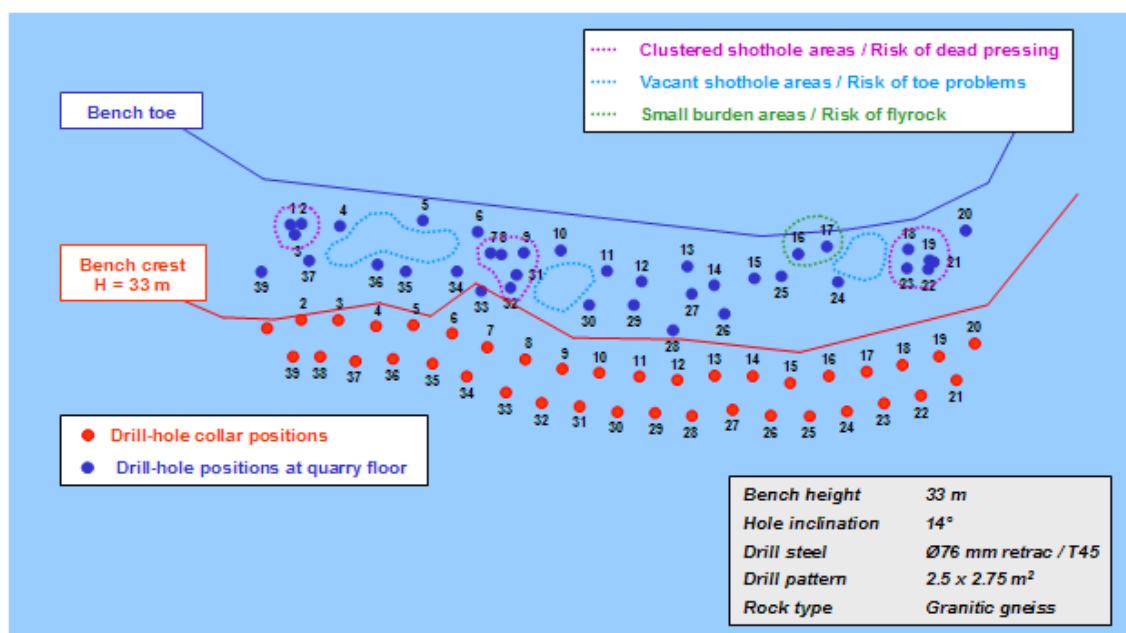


Figura 45 – Consequências dos desvios de perfuração na distribuição do explosivo no volume de maciço rochoso que se pretende desmontar (Sandvik-Tamrock, 2009).

Quando se fala em desvios de perfuração é habitual falar em erro de perfuração, contudo são conceitos diferentes. Enquanto o erro está associado a factores que se podem corrigir ou evitar como, por exemplo, os erros humanos, o desvio está normalmente ligado a factores que não se podem evitar, como é o caso da anisotropia do maciço rochoso ou mesmo os parâmetros geometricos da pega. Os erros de perfuração devem ser identificados para posteriormente serem corrigidos. Os desvios de perfuração devem ser estudados para posteriormente serem minimizados.

2.8.3. TIPOS DE DESVIOS

Desvio associado a erros de execução da perfuração e/ou erros motivados pelas condicionantes da própria bancada (regularidade e limpeza da bancada):

- Posicionamento;
- Emboquilhamento;
- Direcção;
- Inclinação;
- Comprimento/Cota.

Desvio associado à anisotropia do próprio maciço rochoso e às suas características geológicas, geotécnicas e geomecânicas:

- Flexão – Desvio progressivo mas constante ao longo do furo;
- Pontual – Desvios pontuais da trajectória do furo inerentes às anisotropias do maciço rochoso.

Os Quadros 19 a 22 descrevem os cinco tipos de erros mais comuns de perfuração, as suas possíveis causas e eventuais medidas de correcção ou de minimização.

Quadro 19 – Erro de posicionamento (adaptado de Ramos, 2008).

Erro	Descrição	Causas	Medidas correctivas ou de minimização
1) Posicionamento	É considerado o primeiro tipo de erro possível de se cometer na execução do furo. Consiste em não iniciar o furo no ponto previamente marcado.	Utilização de técnicas de marcação pouco eficazes, como a utilização de conjuntos de pedras encasteladas para a marcação dos furos, não sendo aconselhável a sua utilização devido a possíveis deslocamentos, devido à movimentação do carro de perfuração.	Utilização de spray para a marcação dos furos, no próprio maciço. Caso o estado da bancada não o permita deve-se fazer uma marca numa pedra o mais achatada possível de forma a não se deslocar com a movimentação do carro de perfuração.
		A marcação da pega não respeita os parâmetros geométricos definidos (Espaçamento (E) e a distância à frente (V)).	Utilização de ferramentas de auxílio como por exemplo uma corda para o alinhamento das fiadas e uma fita para a marcação das distâncias. Implementação dos furos com sistema GPS.

Quadro 20 – Erro de Emboquilhamento (Adaptado de Ramos, 2008).

Erro	Descrição	Causas	Medidas correctivas ou de minimização
2) Emboquilhamento	O Emboquilhamento é a zona entre a boca do furo e um comprimento de 1 a 2 m de vara introduzida no maciço (dependendo do estado da bancada), ao qual pode estar associado um erro relacionado com as condicionantes da mesma, como é o caso da regularidade e/ou do material solto na superfície.	Bancadas irregulares com zonas de difícil estabilização do carro de perfuração e coluna. Bancadas com elevada altura de material deixado nas bancadas para a tornar mais regular.	Limpar a bancada de forma a não ter material partido e /ou solto na sua superfície. Evitar os excessos ou défices de sub-furação.

Na Figura 46 é apresentado o posicionamento do equipamento de perfuração para a execução do furo.

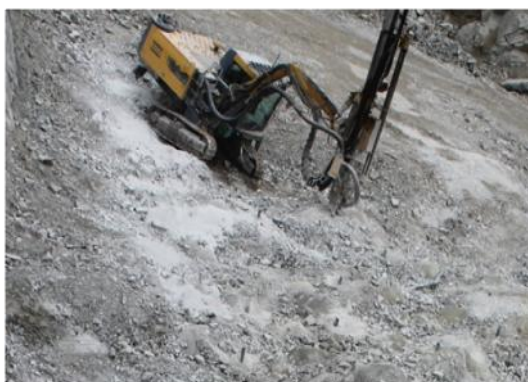
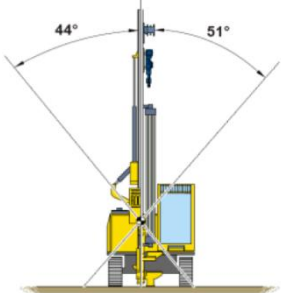
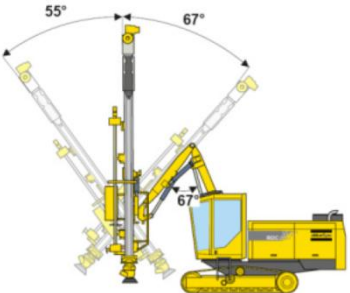


Figura 46 – Posicionamento do equipamento de perfuração.

Quadro 21 – Erro de direcção e inclinação (Adaptado de Ramos, 2008).

Direcção		Inclinação	
			
Erro	Descrição	Causas	Medidas correctivas ou de minimização
3) Direcção	A direcção do furo não está de acordo com o ângulo previamente definido.	Estes tipos de erros estão directamente ligados com os dispositivos de controlo e monitorização que o equipamento de perfuração dispõe.	<p>Nos equipamentos mais recentes deve-se avaliar os instrumentos de controlo e monitorização, verificando que tipos de dispositivos comportam, que parâmetros controlam e com que finalidade o fazem.</p> <p>Nos equipamentos mais antigos deve-se ter bastante rigor no posicionamento do carro e da coluna, de forma a minimizar ao máximo os erros de direcção e inclinação.</p>
4) Inclinação	A inclinação do furo não está de acordo com o ângulo previamente definido.		

Quadro 22 – Erro de comprimento e cota (Adaptado de Ramos, 2008).

Erro	Descrição	Causas	Medidas correctivas ou de minimização
5) Comprimento/Cota	O comprimento do furo e/ou a cota atingida pelo furo não está de acordo com o previamente definido.	Este tipo de erro está directamente ligado com os dispositivos de controlo e monitorização que o equipamento de perfuração dispõe, assim como podem ser gerados pela influência de desvios de perfuração e/ou outros erros como a direcção e/ou inclinação.	<p>Este erro deixa de existir caso o equipamento de perfuração possua um sistema de controlo de cotas.</p> <p>Caso o equipamento possua dispositivo de controlo de comprimento do furo, deve-se ter em consideração o relevo da superfície da bancada para definir com rigor o comprimento com que cada furo deve ser executado. Nestes casos, a utilização de uma corda esticada e nivelada poderá facilitar a definição do comprimento de cada furo.</p>

2.9. DESVIO DE PERFURAÇÃO

O processo de perfuração, mais concretamente, a realização do furo, surge da interacção entre as ferramentas de execução e o maciço rochoso segundo uma geometria imposta pelo diagrama de fogo. Nesta interacção, estão envolvidos vários parâmetros que intervêm, directamente, na qualidade da perfuração (Figura 47). Estes parâmetros serão posteriormente parametrizados, de forma a facilitar a análise da origem dos desvios de perfuração.

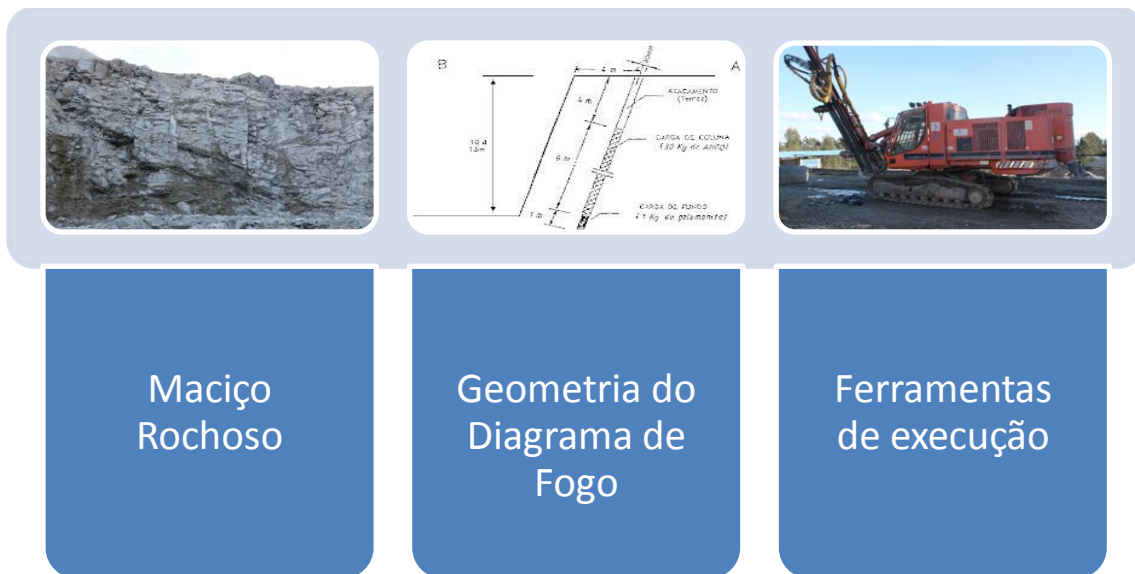


Figura 47 – Parâmetros que influenciam os desvios de perfuração.

2.9.1. FERRAMENTAS DE EXECUÇÃO

As ferramentas de execução têm bastante influência nos desvios de perfuração. No Quadro 23 estão referenciadas as ferramentas de execução que foram utilizadas neste caso de estudo. O carro de perfuração utilizado durante todas as pegadas monitorizadas foi Ranger 600 (Figura 48).



Figura 48 – Equipamento de perfuração.

Quadro 23 – Ferramentas utilizadas na execução da perfuração.

Ferramentas de Execução	
Equipamento de perfuração	<ul style="list-style-type: none"> • Martelo hidráulico
Método de perfuração	<ul style="list-style-type: none"> • Rotopercussão • Martelo à cabeça
Acessórios de perfuração	<ul style="list-style-type: none"> • Encabadouro • Varas • Bit
Parâmetros de regulação	<ul style="list-style-type: none"> • Rotação • Pressão • Limpeza • Avanço

2.9.2. EQUIPAMENTOS DE PERFURAÇÃO

O equipamento de perfuração foi dividido em três pontos de avaliação e cada um desses foi subdividido em dois ou mais parâmetros de avaliação, para se tornar mais fácil e rápida a análise dos sistemas e acessórios que este equipamento dispõe (Quadro 24).

- **Carro de perfuração:** devido à diversidade de equipamentos de perfuração, é importante registar sempre o modelo e o martelo correspondente.
- **Sistema de controlo e monitorização:** o uso correcto dos sistemas de monitorização do equipamento de perfuração terá influência na qualidade e alinhamento do furo. O sistema de controlo e monitorização utilizado no equipamento deste caso de estudo é considerado bastante satisfatório e fiável, o que permite reduzir a probabilidade de ocorrerem erros de perfuração.
- **Coluna:** a coluna é avaliada segundo a sua rigidez e o número de apoios das varas. A rigidez é variável consoante o tipo de liga que a constitui, consideram-se dois tipos de colunas, a coluna de ferro e a coluna de aço. O número de apoios das varas permite avaliar o equipamento do ponto de vista da sua estabilidade, quanto mais pontos de apoio têm a vara, maior será a estabilidade e precisão com que se conseguirá executar o furo.

Quadro 24 – Avaliação do equipamento de perfuração (Adaptado de Ramos, 2008).

Equipamento de Perfuração			
Carro de perfuração	Modelo	Ranger 600	
	Martelo Superfície		
Sistema de controlo e monitorização	Direcção	Não possui	
		Pouco Fiável	
		Fiável	X
		Muito Fiável	
	Inclinação	Não possui	
		Pouco Fiável	
		Fiável	
		Muito Fiável	X
	Comprimento	Sim	X
		Não	
	Profundidade	Sim	
		Não	X
Coluna	Rigidez	Ferro	
		Aço	X
	Apoios	Insuficiente (1)	
		Suficiente (2)	X
		Bom (3)	

2.9.3. MÉTODOS DE PERFURAÇÃO

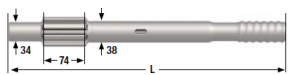
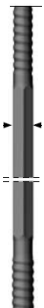

A maioria dos equipamentos de perfuração utilizados em bancada e, muito particularmente na zona norte, devido essencialmente às características geológicas é o método rotopercussivo com martelo de superfície. Este foi o método utilizado neste estudo.

O martelo de superfície (Top-hammer) possui dois sistemas de accionamento: rotação e percussão. As respectivas forças são transmitidas do encabadouro para as varas e consequentemente para o bit de perfuração.

2.9.4. ACESSÓRIOS DE PERFURAÇÃO

São os acessórios de perfuração que transmitem a energia disponível proveniente do martelo de perfuração à rocha, possibilitando assim a fragmentação desta. Os acessórios utilizados no equipamento de perfuração foram: encabadouro, varas e bit. No Quadro 25 são apresentados os acessórios de perfuração utilizados neste caso de estudo.

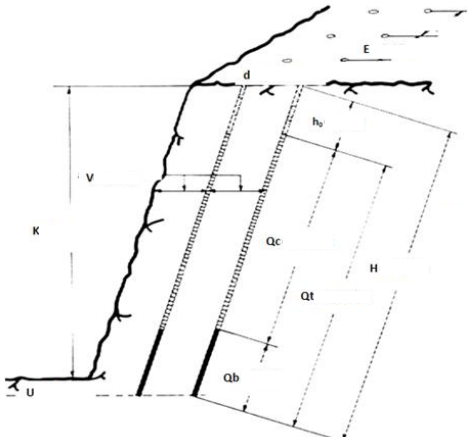
Quadro 25 – Avaliação dos acessórios de perfuração (Adaptado de Ramos, 2008).

Acessórios de Perfuração				
Encabadouro		Tipo	T38 T45 T51	X
Varas		Tipo	T38 T45 T51	X
		Modelo	Standard Número de varas Guias	X
		Marca	Sandvik Mitsubishi Robit	X
Bit		Modelo	Standard Retrac Guia	X
		Marca	Sandvik Mitsubishi Robit	X
		Botão	Esférico Semi-Balístico Balístico	X
		Metros lineares executados		
		Estado	Novo Afiado Usado	X

2.9.5. GEOMETRIA DO DIAGRAMA DE FOGO

No Quadro 26 são apresentados os parâmetros da geometria do diagrama de fogo, sendo que apenas o diâmetro do furo, o comprimento do furo e a inclinação do furo têm influência na gênese dos desvios de perfuração. Também se considera a orientação da bancada como um parâmetro geométrico a ter em conta devido à importância que assume na leitura dos desvios.

Quadro 26 – Parâmetros da geometria do diagrama de fogo.

Geometria do Diagrama de Fogo			
	d – Diâmetro do furo	mm	
	K – Altura da Bancada	m	
	U – Subfuração	m	
	H – Comprimento do furo	m	
	V – Distancia à frente	m	
	E – Espaçamento entre furos	m	
	I – Inclinação do Furo	º	
	ho - Tamponamento	m	
	Orientação	Furos	N...E
		Frente Livre	N...E

2.9.6. DIÂMETRO DO FURO

Segundo a fórmula de Langefors & Kihlstrom (1978), $F = (d/1000) + 0,3 \times H$, verifica-se que o diâmetro do furo tem influência nos desvios resultantes. No caso da expressão referida, o aumento do diâmetro do bit faz aumentar os desvios espectáveis, o que na prática não é isso que acontece, sendo precisamente o contrário.

2.9.7. COMPRIMENTO DO FURO

Este é um dos parâmetros da geometria do diagrama de fogo que mais poderá influenciar os desvios de perfuração, principalmente quando se ultrapassa uma certa profundidade. Isto deve-se, essencialmente porque à medida que o furo avança, o ponto de emissão de energia (martelo à cabeça), está cada vez mais afastado do ponto de actuação de energia (maciço rochoso), havendo

maior comprimento de varas entre esses dois pontos, levando a existir maior susceptibilidade à flexão das varas, logo, a possibilidade de ocorrerem maiores desvios de perfuração.

2.9.8. INCLINAÇÃO DO FURO

A inclinação do furo tem grande influência principalmente no desvio frontal, sendo importante avaliar a intersecção ao nível do ângulo de intercepção, no plano perpendicular à frente livre, entre o furo e os elementos de descontinuidades que atravessam o maciço rochoso. Certos autores consideram que o ângulo de intersecção, entre o furo realizado e as descontinuidades presentes no maciço, que faz variar o comportamento do desvio, é de 15° (Figura 49).

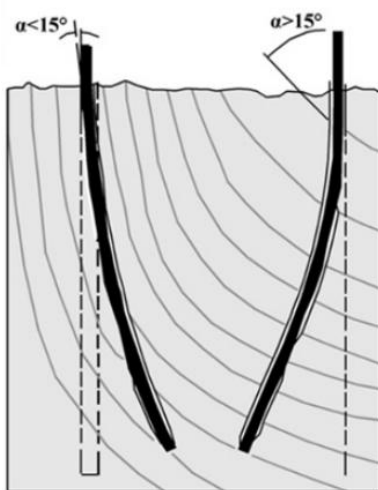


Figura 49 – Ângulo de intersecção entre o furo e as descontinuidades do maciço.

2.9.9. OPERADOR

O operador é um dos parâmetros mais importantes de avaliar, contudo também é o mais difícil. Devido à dificuldade na avaliação do operador, criou-se uma avaliação de três parâmetros que permite avaliar o desempenho do operador: a experiência que o operador possui para desempenhar o cargo, a sensibilidade do operador para a execução do furo e o conhecimento geral na área de perfuração, domínio dos sistemas de controlo e monitorização do equipamento (Quadro 27).

Quadro 27 – Avaliação do operador.


Operador		
Experiência	Muita	X
	Alguma	
	Pouca	
Sensibilidade	Muita	X
	Alguma	
	Pouca	
Conhecimento	Muito	
	Algum	X
	Pouco	

2.9.10. PARÂMETROS DE REGULAÇÃO

São considerados parâmetros de regulação: a pressão, o avanço, a rotação e a limpeza (Quadro 28). Destes quatro parâmetros, o avanço é considerado o parâmetro que mais poderá influenciar na génese do tipo e gradiente do desvio, sendo que avanço muito elevado potencia os desvios de perfuração.

Para executar furos bem alinhados, é necessário que o furo esteja bem limpo, evitando que exista entre a ferramenta de corte e o maciço, fragmentos de rocha que possam influenciar a trajectória do furo.

Quadro 28 – avaliação dos parâmetros de regulação.

Parâmetros de regulação		
	Rotação (bar)	
	Pressão (bar)	
	Limpeza (bar)	
	Avanço (bar)	

2.9.11. LIMPEZA DA BANCADA (EMBOQUILHAMENTO)

No que diz respeito à limpeza da bancada, esta deve estar o mais limpa possível, com o mínimo de material solto presente na superfície. A melhor opção seria proceder sempre à limpeza da bancada, contudo, essa operação de limpeza pode dar origem a uma bancada irregular, mesmo assim, essa irregularidade é pouco representativa, visto que a altura de material solto que pode estar depositado na bancada, prejudica mais a qualidade da perfuração do que propriamente a irregularidade da mesma.

A qualidade do emboquilhamento melhora quando as bancadas estão limpas (Figura 50). Sabendo que o emboquilhamento potencia o desvio de perfuração, optou-se por avaliar este parâmetro em função da profundidade a que o furo é emboquilhado (Quadro 29).

Quadro 29 – Avaliação do Emboquilhamento.

Emboquilhamento		
Na rocha	0	
Pouco material desagregado	<0,25	
Algum material desagregado	0,25 – 0,5	
Muito material desagregado	> 0,5	



Figura 50 – Exemplos de bons e maus emboquilhamentos.

2.9.12. REGULARIDADE DA BANCADA

É importante que a bancada seja regular para que o equipamento de perfuração fique o mais estável possível para a execução do furo (Figura 51). Para classificar este parâmetro foram medidos os intervalos de desnível entre furos, tornando assim possível ter uma percepção da maior ou menor dificuldade de estabilização do equipamento de perfuração (Quadro 30).

Quadro 30 – Avaliação da regularidade da bancada

Regularidade da bancada		
Regular	<0,5	
Irregular	0,5 – 1,0	
Muito irregular	>1,0	



Figura 51 – Instabilidade do equipamento de perfuração.

2.9.13. MEDIÇÃO DOS DESVIOS

O equipamento utilizado na medição dos desvios é o Boretrak. Este equipamento permite efectuar o levantamento contínuo de desvios laterais (ângulo real perpendicular à frente de desmonte Norte/Sul), desvios frontais (ângulo real medido paralelamente à frente de desmonte Este/Oeste). Permite também saber a profundidade real do furo.

O Boretrak é constituído por (Figura 52):

- Uma sonda “Sensor Probe” com dois inclinómetros perpendiculares, eixos medidos (Pitch & Roll);
- Um conjunto de varas articuladas com 1m de comprimento cada e com um suporte para as varas “Single (m) Rack”;
- Um dispositivo de controlo “Control Display Unit”;
- PC com software compatível.

A medição é realizada a partir da sonda de aço inoxidável e alumínio. As varas são constituídas por fibra de vidro. O peso total do equipamento de 30m de varas é de 11,5 Kg.



Figura 52 – Equipamento Boretrak (<http://www.alphageofisica.com.br/mdl/boretrak.htm>).

➤ *PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO*

O equipamento Boretrak possui um chip microprocessador que utiliza sensores electrolíticos de gravidade para determinar a inclinação. O equipamento deve ser colocado perpendicular ou paralelo ao sentido da furação, dependendo do azimute definido. A sonda faz duas leituras em cada registo, “Pitch” e “Roll”, que representam duas inclinações medidas perpendicularmente entre si, a partir das quais se consegue calcular os desvios laterais e frontais. É certo que à mínima distorção na colocação do equipamento a leitura das inclinações torna-se um pouco distorcida. É possível saber o comprimento real do furo a partir da contagem do número de varas que é introduzido no furo (Figura 53).



*Figura 53 – Posicionamento do equipamento Boretrak
(<http://www.alphaeofisica.com.br/mdl/boretrak.htm>).*

➤ *MODO DE OPERAÇÃO*

A sonda é fixada à primeira vara e seguidamente introduzida no furo até à profundidade pretendida de leitura. Cada vara possui 1m de comprimento, o que permite ter um maior controlo da profundidade da leitura. Após a colocação da sonda à profundidade pretendida, estabiliza-se o conjunto (varas mais sonda) e com um dispositivo de controlo, regista-se a primeira leitura (o intervalo de leitura é definido no início do ensaio). O processo é repetido até atingir a cota final, nessa altura é corrigida a profundidade do furo. No final do ensaio, os resultados são descarregados para um PC com software específico o qual nos permite analisar graficamente o estado da furação (Figura 54).

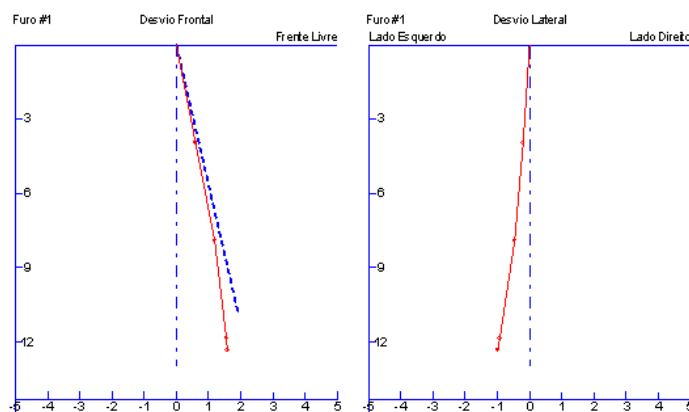


Figura 54 – Software utilizado na análise dos desvios de perfuração.

2.9.14. MEDIÇÃO POR LASER

Os aparelhos de medição de distâncias a laser são perfeitos para medir rapidamente dimensões exactas. São equipados com uma tecnologia laser, os medidores de distâncias a laser proporcionam resultados com um elevado nível de precisão e fiabilidade.

O ensaio consiste em medir com rigor a distância a que o furo está da frente livre, ou seja, o laser faz a medição constante da distância à frente em toda a extensão do furo. O operador deve-se colocar na bancada inferior e de frente para a bancada que pretende realizar a medição, deve-se posicionar no alinhamento do furo, apontando o laser para o topo da bancada e à medida que vai percorrendo o furo até a cota final o próprio equipamento regista medições contínuas das distâncias à frente (Figura 55).



Figura 55 – Medição de distâncias a laser.

CAPÍTULO III



Mina de cobre em Bingham Canyon, Utah

3. CASO DE ESTUDO DA PEDREIRA DE CURVIÃ

- 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS
- 3.2. ENQUADRAMENTO DA PEDREIRA
- 3.3. DESCRIÇÃO DE MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS
- 3.4. PEDREIRA DE V.N. DE FAMALICÃO
- 3.5. ANALISE DOS RESULTADOS
- 3.6. RESULTADOS

3. CASO DE ESTUDO DA PEDREIRA DE CURVIÃ

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Tal como foi referido anteriormente, o presente trabalho teve como principal objectivo estudar os ângulos de intersecção entre o furo e a descontinuidade tentando verificar a existência de alguma correlação entre o desvio e esse ângulo. Além disso, abordou-se, do ponto de vista metodológico, quais os parâmetros geológico-geotécnicos que influenciam os desvios de perfuração. Para atingir esse objectivo procedeu-se ao estudo geotécnico e geomecânico de pormenor de uma série de bancadas da pedreira de V.N. Famalicão. Nestas bancadas, efectuaram-se estudos geológicos fundamentais e levantamentos geotécnicos - geomecânicos de pormenor para se definir o grau de compartimentação do maciço rochoso.

O maciço rochoso em estudo faz parte de uma faixa de granitóides relacionados com a orogenia Varisca (ou Hercínica). Do ponto de vista geológico, este insere-se nos terrenos graníticos da zona Centro-Ibérica (ZCI) do maciço Ibérico, o que corresponde a uma das unidades mais importantes dentro do maciço Hespérico (Figura 56). O maciço rochoso objecto do estudo foi a pedreira granítica de V.N. de Famalicão, situada no Minho.

A região encontra-se cartografada, à escala 1/50 000, pelos serviços Geológicos de Portugal [Folhas 5-D (Braga) – Ferreira et al., 2000 e 9-B (Guimarães) – Andrade & Rocha, 1986]. O granito que aflora na área de estudo está referenciado como Granito de Airão, Aves e Roriz (Figura 56) (Anexo III). Este corresponde a um monzogranito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico. Este granito possui cor geralmente cinzenta e textura bastante uniforme, apresenta-se medianamente fracturado e, por vezes, alterado, caso em que adquire tonalidade amarelada. O local insere-se numa zona com grande estabilidade tectónica e

risco sísmico reduzido a baixo, ou seja, localiza-se numa das zonas mais estáveis de Portugal Continental.

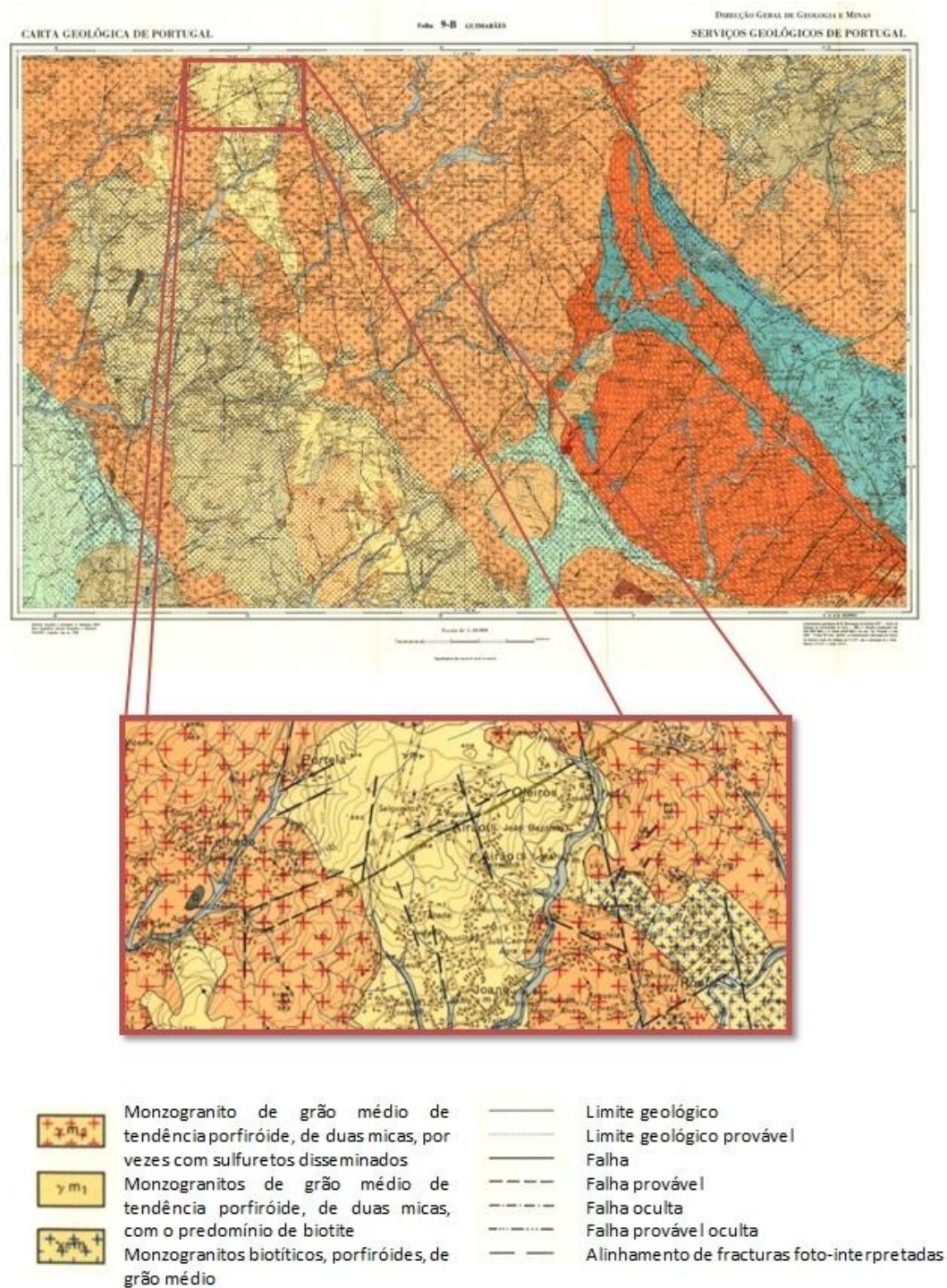


Figura 56 – Carta geológica da zona em estudo. (adaptado da carta geológica 9-B (Guimarães) – Andrade & Rocha, 1986).

3.2. ENQUADRAMENTO DA PEDREIRA

A pedreira da Secil localiza-se no distrito de Braga, concelho de Vila Nova de Famalicão, freguesias de Portela e Joane, mais concretamente no lugar de Curviã (Figura 57) (Anexo I). Em termos regionais, a área do estudo situa-se na parte norte da bacia hidrográfica do rio Ave, que circula mais a sul. Esta bacia encontra-se limitada a norte pela bacia do rio Cávado, a sul pela bacia do rio Douro e, a oeste pelo Oceano Atlântico. As cartas topográficas utilizadas foram nº 70 (Braga) e a nº 84 (Selho – Guimarães) dos serviços cartográficos do exército, à escala 1/25 000.

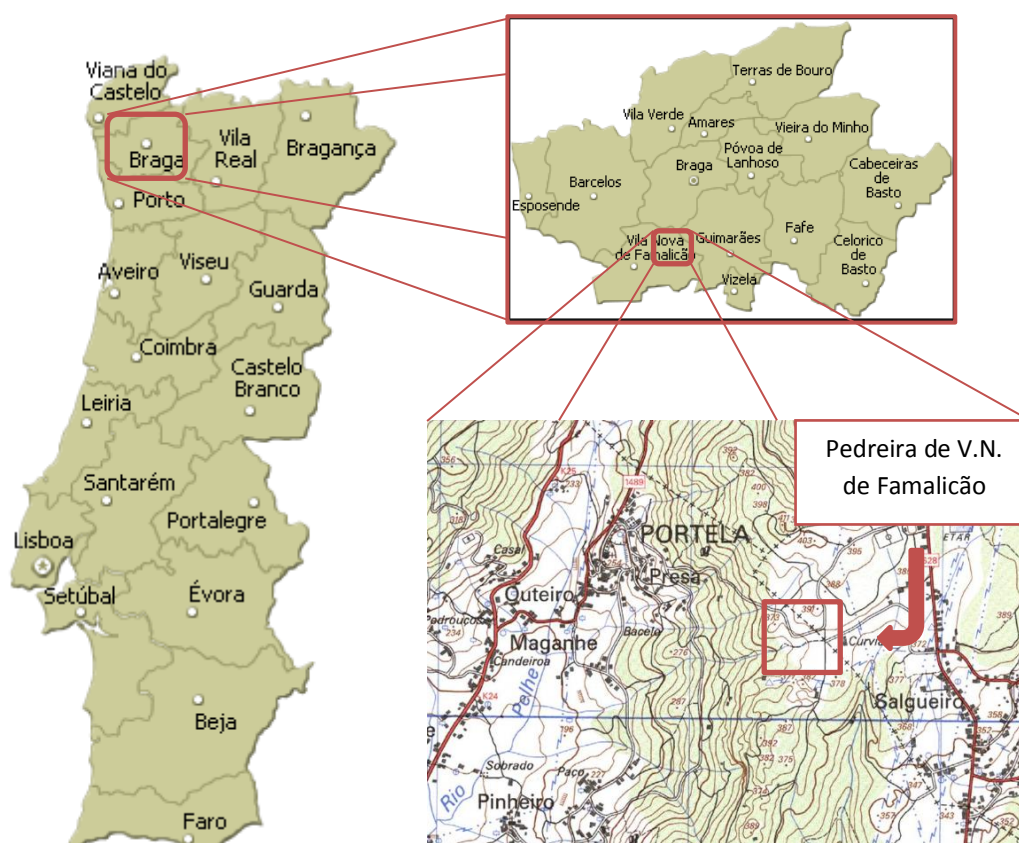


Figura 57 – Localização da Pedreira de V.N. de Famalicão.

A pedreira de V.N. de Famalicão (Figura 58), situa-se a cerca de 1000m a SE da povoação de Portela (Stª Marinha) e a cerca de 1000m a W de Airão, sendo, por ambos os lados, facilmente acessível (Anexo II). O acesso à pedreira faz-se através da EN 206 no troço que liga Famalicão a Guimarães. Após a passagem pela A3 cerca de 500m à frente, em Cruz do Pelo, vira-se no cruzamento à esquerda pela EN309. Segue-se nessa estrada passando as povoações de Telhados, Maganhe e Portela e percorridos cerca de 7,6Km, após o segundo cruzamento para Portela e

antes de Longra, vira-se à direita. Segue-se a estrada em alcatrão, sempre a subir cerca de 1,5Km, onde por fim se encontra a Pedreira.

Da rede viária que circunda e serve a área da pedreira mais próxima, destaca-se as seguintes vias:

Rede principal (Estradas Nacionais):

- ER206 - entre Vila do Conde e Guimarães, constitui a principal ligação entre as estradas municipais e as auto-estradas IP1 (A3) e IC5 (A7);
- IP1 (A3) - serve de ligação para os principais destinos – Porto e Braga;
- IC5 (A7) – actualmente liga Póvoa do Varzim (IC1) – Famalicão – Guimarães – Fafe – Vila Pouca de Aguiar.

Rede distribuidora e secundária (Estradas municipais):

- EM309 – liga a freguesia de Portela, Telhado e outras à ER206, no sentido sul e no sentido norte liga com a EN14;
- EM628 – liga as freguesias de Airão (S. João Baptista) e Airão (Sta. Maria) à ER206, no sentido sul e no sentido norte, liga a EM309 que por sua vez liga à EN14 (Porto-Braga).

A actividade desenvolvida actualmente pela SecilBritas, S.A., caracteriza-se pela extracção de granitos para a produção de inertes para obras públicas e construção civil. Com a ampliação que pretendem fazer na pedreira prevê-se que possam ser explorados cerca de $12.332.966\text{m}^3$ de reservas geológicas, durante um período de cerca de 44 anos (segundo dados de 2010).



Figura 58 – Vista da pedreira de V.N. de Famalicão.

3.3. DESCRIÇÃO DE MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

No presente trabalho, tentou-se seguir os procedimentos, normas e terminologias utilizados na realização de estudos geotécnicos de maciços rochosos, a saber:

- As técnicas e métodos de campo propostos por ISRM (1978), GSE (1995), Ferrer & González de Vallejo (1999);
- A “Basic Geotechnical Description of Rock Masses” (BGD) proposta pela ISRM (1981), para a caracterização geológico-geotécnica da compartimentação de maciços rochosos com recurso à técnica de amostragem linear em superfícies expostas de descontinuidades do maciço (e.g., ISRM, 1981; Chaminé & Gaspar, 1995; Dinis da Gama, 1995).

Foram consultadas as seguintes bases topográficas: as folhas 70 e 84, IGeoE, Carta Militar de Portugal, à escala 1/25 000. Foram também consultadas: as Folhas 5-D (Braga) – Ferreira et al., 2000 e a 9-B (Guimarães) – Andrade & Rocha, 1986, dos Serviços Geológicos de Portugal, à escala 1/50 000.

Para a realização do estudo da compartimentação do maciço rochoso na bancada seleccionada, utilizou-se a técnica de amostragem linear (ISRM, 1978,1981; Chaminé & Gaspar, 1995; Brady & Brown, 2004). A aplicação desta técnica no maciço rochoso da pedreira de V.N. de Famalicão fez-se com a colocação de uma fita graduada (em metros) a, aproximadamente, 1,5m da base da bancada. Posteriormente, nos pontos iniciais de medição foram georreferenciados por um GPS de alta-precisão “Trimble Geoexplorer” do Labcarga|ISEP. De seguida, foram cartografados de uma forma sistemática todas as descontinuidades (diaclases, falhas, estruturas filonianas, ...) que intersectavam essa mesma fita. Cada uma das descontinuidades foi registada nas fichas de levantamento geológico-geomecânico (Anexo IV) segundo os parâmetros geológico-geotécnicos propostos pela ISRM (1981).

Os principais parâmetros determinados para a caracterização do maciço, foram, entre outros, os seguintes: a atitude, a abertura, o espaçamento (“Fracture Intercept”), a continuidade, o tipo de enchimento, a rugosidade e a presença de água. Desta forma, para o estudo da compartimentação do maciço, foi utilizada a técnica de amostragem linear às superfícies expostas dos taludes. O estudo foi realizado em duas pegadas sucessivas na mesma bancada do maciço. O local foi seleccionado tendo em conta os seguintes critérios:

- Fácil acessibilidade ao local com condições técnicas e de segurança viáveis para a aplicação da técnica de amostragem linear ao longo de uma série sucessiva de taludes;
- Sabendo que a pedreira se encontrava em funcionamento, o levantamento geológico-geomecânico de campo não poderia perturbar o normal funcionamento da mesma;
- Era importante que este estudo técnico-científico incidisse num local onde fosse possível a realização de sucessivas pegadas na mesma bancada.

Antes de realizar o estudo de campo, efectuou-se uma pesquisa sobre as ferramentas e utensílios utilizados para aplicação da técnica de amostragem linear, bem como a realização de fichas de levantamento geológico-geomecânico, para posterior análise e tratamento dos dados recolhidos. O equipamento de campo utilizado, já referenciado no capítulo 2, foi o martelo de geólogo, pregos, fita métrica, bússola com inclinómetro e o martelo de Schmidt. Todo esse material de campo foi cedido pelo Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP. As fichas de registo de campo utilizadas foram: a ficha de levantamento geológico-geomecânico e do levantamento ensaio com esclerómetro portátil (martelo de Schmidt, tipo L) ambas desenvolvidas por Ramos (2008) e Fonseca (2008). Foram também utilizadas as bases de dados (ScanGeoData|BGD e a SchmidtData|UCS) que permitiram compilar a informação de forma simples e de fácil interpretação.

A base de dados ScanGeoData|BGD que se encontra em formato Ms. Office Excel 2007, possibilitou também realizar analiticamente o que o software Dips da RocScience apresenta graficamente, ou seja, é possível definir as principais famílias de descontinuidades calculando a sua representatividade em termos de números de descontinuidades contempladas por intervalos e percentagem através de um quadro de pesquisa.

As diferentes famílias de descontinuidades de cada painel foram definidas através da elaboração de diagramas geológico-estruturais – diagramas de contorno estrutural e diagramas de rosetas, tendo sido utilizado o Software Dips versão 5.1 da RocScience. O programa está licenciado, para fins académicos, ao Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (Labcarga) do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

Foi utilizado o Esclerómetro Portátil ou martelo de Schmidt para estimar “in situ” a resistência à compressão simples do maciço, sendo estes dados registados em fichas de levantamento, segundo as propostas da ISRM (1978, 1981, 1987, 2007) e ASTM (2001). Posteriormente, estes dados foram tratados na base de dados SchmidtData|UCS. Foram recolhidos no 3º painel duas amostras do maciço mais alterado, W3, e do maciço são, W1, para aferir a sua resistência em termos de índice de carga pontual, através do ensaio de Carga Pontual (“Point Load Test”), de acordo com a proposta da ISRM (1985, 2007). Os dados referentes aos ensaios Los Angeles e Micro Deval, recorreu-se aos registos da pedreira da Secil para obter os dados.

Foram ainda recolhidas algumas amostras de rocha, que foram utilizadas para realizar os ensaios de Perfurabilidade e o ensaio de friabilidade-Brittleness Test. O ensaio de Perfurabilidade foi concebido no Laboratório de Mecânica das Rochas do Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico, em Lisboa, e para ser possível a realização do ensaio bem como o deslocamento do material, cortaram-se as amostras numa dimensão adequada, obtendo-se por fim o valor SJ de Sievers. O ensaio de Friabilidade-Brittleness Test foi realizado no Laboratório de Materiais de construção do ISEP, em que foi necessário proceder à fragmentação da amostra para ser possível a realização do ensaio, através deste obteve-se o valor Brittleness S20. A combinação entre estes dois parâmetros: valor SJ de Sievers e o valor Brittleness S20, foi possível a partir de um gráfico obter o valor Drilling Rate Index (DRI) que caracteriza a Perfurabilidade do maciço.

Foi realizado o ensaio Boretrak e o laser em todas as pegs, tendo sido estes ensaios executados pela Empresa Orica. A partir do ensaio Boretrak foi possível fazer a medição dos desvios de perfuração. Após a sua realização todos os dados foram descarregados para um PC com um software compatível onde foi possível analisar graficamente o estado da furação. Através do Laser foi possível obter com elevada precisão a irregularidade da frente da bancada, para posteriormente definir uma distância à frente mais adequada.

3.4. PEDREIRA DE V. N. DE FAMALICÃO

3.4.1. BREVE ANÁLISE DOS PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

Todos os parâmetros geológico-geotécnicos que se obtiveram da pedreira em estudo (Figura 59), foram resultado de 127 descontinuidades medidas em três faces expostas do maciço com uma extensão compreendida entre 25 a 35 m.



Figura 59 – Visualização do maciço rochoso e da bancada onde se efectuou o estudo.

3.4.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ROCHOSO

A zona mais superficial apresenta granito de cor amarelada com alteração, tal como acontece em estreitas faixas ao longo dos bordos de algumas das diaclases onde a rocha é de cor amarelada – acastanhada se circunscrever as zonas de circulação das águas superficiais ou infiltradas. Outras vezes, essa tonalidade está associada a zonas de esmagamento (cisalhamento, caixa de falha), sendo de realçar uma larga faixa da zona nascente controlada por fracturas paralelas de orientação sensivelmente N10ºE, responsáveis pela reactivação de fracturas mais antigas. No seio desta massa fracturada e alterada, individualiza-se, em alguns locais, “bolas” de granito duro, com cerca de um metro a dois de diâmetro.

Verifica-se ligeiras variações ao longo do maciço, nomeadamente com um ligeiro aumento do tamanho do grão da matriz e da tendência porfiróide, quase traduz por maior abundância de pequenos cristais feldspáticos maiores que os da matriz, mantendo-se dispersos outros de maiores tamanhos (Figura 60).

Segundo os dados fornecidos pela carta hidrogeológica de Portugal, a permeabilidade atribuída as formações rochosas presentes na área variam entre média a baixa e, a sua produtividade aquífera é considerado significativa, com valores situados entre 1 e 3 l/s.km². No Quadro 31 é apresentado um estudo micropetrográfico das amostras do granito da pedreira de V.N. de Famalicão.

Quadro 31 – Resumo do estudo micropetrográfico das amostras do granito (adaptado de CICCOPN, 2010).

Parâmetros	Descrição		
Classificação geológica	Rocha ígnea Plutônica - Granito		
Estrutura	Compacta – composta por minerais leucocratas (feldspato, quartzo e moscovite) e melanocratas (biotite)		
Textura	Holocristalina, fanerítica, tendência porfiróide		
Superfície	Áspera		
Porosidade	Baixa		
Mineralogia	Quartzo	1 a 5 mm	30%
	Feldspatos	1 a 30 mm	60%
	Micas	0,5 a 2 mm	9%
	Outros	-	1%



Figura 60 – Granito da pedreira de V.N. de Famalicão.

3.4.3. PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

É de salientar que o maciço rochoso em estudo foi sendo explorado ao longo de vários anos para a produção de agregados, e como tal seria expectável encontrar um maciço de boa qualidade. O estudo incidiu-se na bancada inferior da pedreira com orientação NE-SW (Figura 61), nessa mesma bancada foram realizadas duas pegas, onde se procedeu ao levantamento geológico, geotécnico e geomecânico em três faces expostas do maciço rochoso (Figura 62). Os valores obtidos indicam baixa representatividade, pelo facto do estudo se ter centrado em pegas de pouca extensão e de o maciço ser pouco fracturado.



Figura 61 – Localização da zona do estudo (Imagem retirada do Google Earth a 26-08-2013).

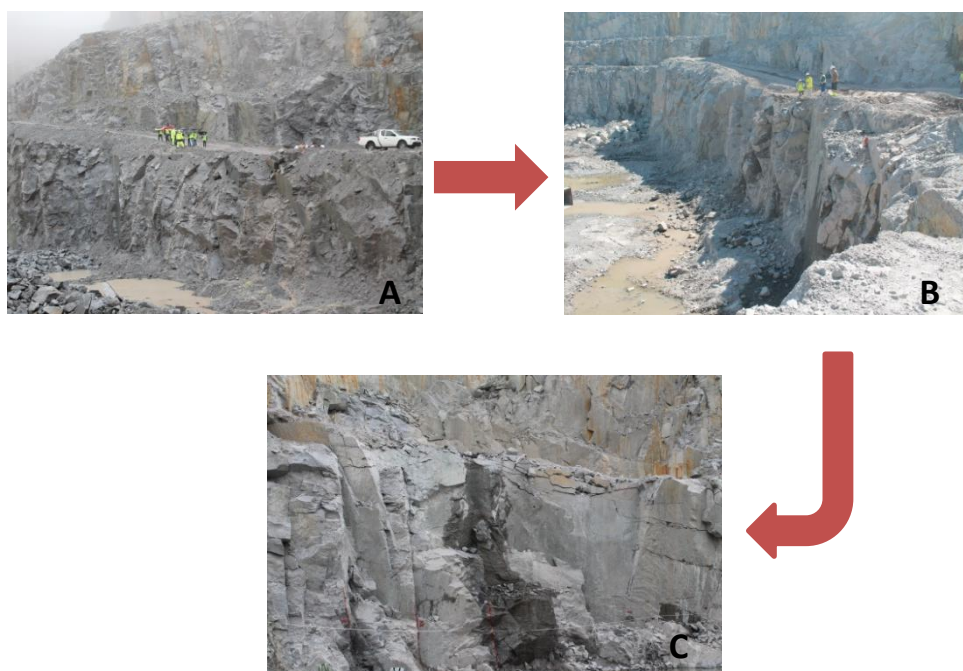


Figura 62 – Levantamento geológico-geotécnico em três faces expostas do maciço. A) 1ª Painel; B) 2ª Painel; C) 3ª Painel.

1º Painel

O 1º Painel possui uma extensão de 35,5m e foram levantadas 49 descontinuidades (Figura 63). Neste painel apenas se realizou o levantamento geológico, geotécnico e geomecânico do maciço, não foi possível a análise pormenorizada das descontinuidades que intersectavam os furos, devido à falta de informação da pega realizada anteriormente a esta.



Figura 63 – 1º Painel.

Os dados recolhidos no terreno, referentes à técnica de amostragem linear aplicada às superfícies expostas (descontinuidades) do maciço rochoso, foram tratados recorrendo a diagramas de contorno estrutural e diagramas de rosetas, os quais permitiram a definição das famílias dominantes.

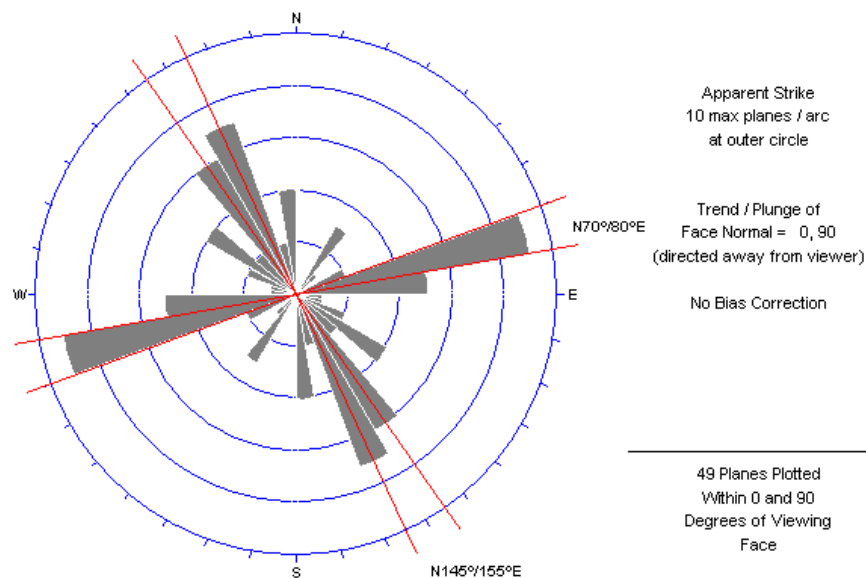


Figura 64 – Diagrama de rosetas do 1ºPainel, com 49 descontinuidades, projectadas em intervalos (pétalas) com 10º de amplitude.

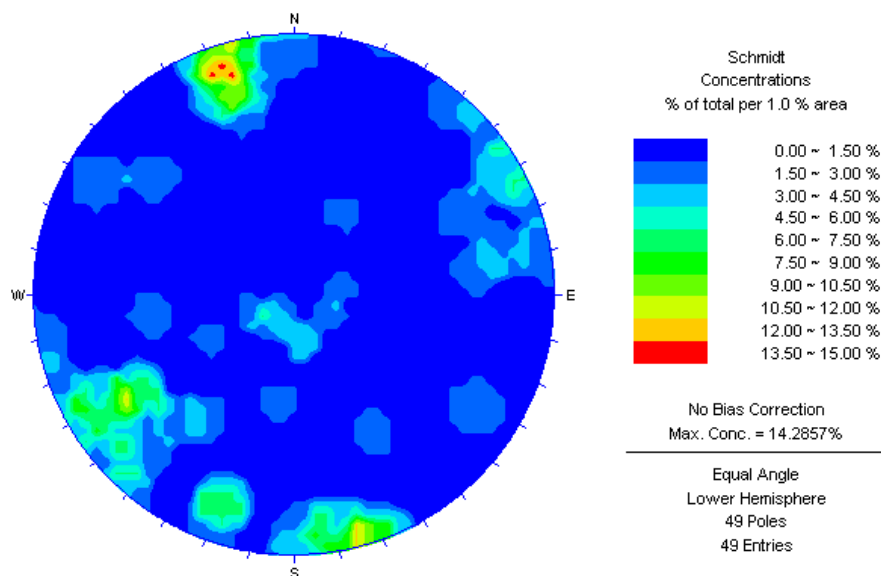


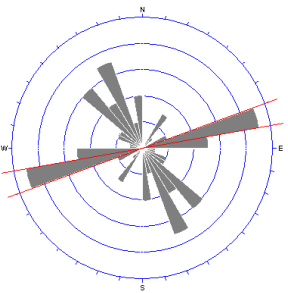
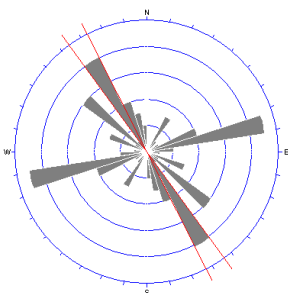
Figura 65 – Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 49 descontinuidades medidas no 1º Painel.

A análise dos diagramas geológico-estruturais do 1º Painel permite ver que as descontinuidades se concentram em duas famílias principais (Figura 64 e 65): a mais importante N70º-80ºE, com inclinações que variam entre 80º-89º para SE e a segunda família N145º-155ºE, com pendores que oscilam entre 70º-80º para NE.

Na projecção e análise das descontinuidades em diagramas de rosetas, está definido por defeito um intervalo com amplitude de 10º com início em 0º. Esta análise nem sempre garante uma definição das principais famílias, o que implica cometer erros na atribuição da ordem das principais famílias, bem como no rigor do intervalo definido para as mesmas. Assim sendo, verificou-se para cada conjunto de pétalas todos os intervalos possíveis, com amplitude de 10º, de maneira a garantir que o intervalo definido para cada uma das duas famílias seja o que contém o maior número de descontinuidades. Visto que as duas famílias apresentam a sua maior representatividade em diferentes intervalos com 10º de amplitude, existe assim a necessidade de a sua representação gráfica fazer-se em diferentes diagramas de rosetas (Quadro 33).

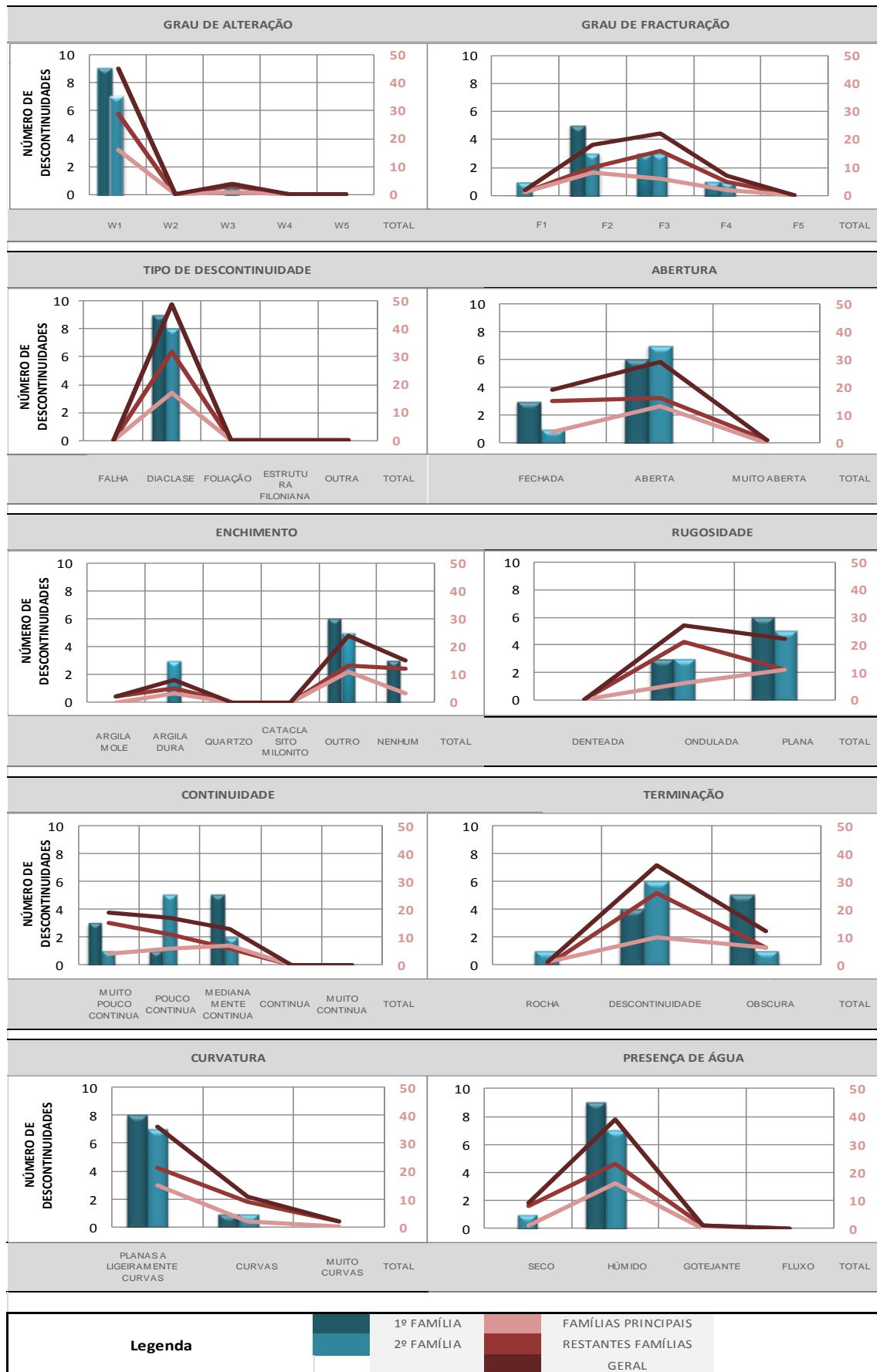
A partir do Quadro 32 pode-se visualizar de uma forma individualizada as famílias principais de descontinuidades com o respectivo diagrama de rosetas, bem como o número e a percentagem de descontinuidades contempladas em cada família. Verifica-se que 35%, ou seja, 17 das 49 descontinuidades estão contempladas em famílias, sendo que dessas 17 descontinuidades, 52,9% estão inseridas na 1ª família, a 2ª família é representada por 47,1% das descontinuidades, sendo que os restantes 65% são referentes a descontinuidades dispersas.

Quadro 32 – Síntese dos dados geológico-estruturais do 1ºPainel.

Família	Direcção	Direcção média	Inclinação média	Diagrama de Rosetas	Número de discontinuidades	
1ª	N[70º/80º]E	N74ºE	83º SE		9	52,9%
2ª	N[145º/155º]E	N151ºE	73º NE		8	47,1%
Intervalo - 10º					17	35%

No Quadro 33 é apresentado toda a estatística referente aos parâmetros geológico-geotécnicos medidos no 1º Painel da pedreira de V.N. de Famalicão. Em cada gráfico é representado o número de discontinuidades para a primeira e segunda família, para as principais famílias, para as restantes famílias e para a totalidade das discontinuidades medidas.

Quadro 33 – Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos do 1º Painei



➤ *GRAU DE ALTERAÇÃO*

O maciço apresenta-se são a ligeiramente alterado, W 1-2, (92%), com um reduzido número de descontinuidades moderadamente alteradas, W3, (8%). Devido ao maciço se apresentar muito pouco alterado, o material-rocha apresenta globalmente uma tonalidade acinzentada. Na análise do grau de alteração nas principais famílias, constatou-se que não se verificam variações em relação à análise geral, ou seja, predomina um maciço são a ligeiramente alterado (W1-2).

➤ *TIPO DE DESCONTINUIDADE*

O maciço rochoso da pedreira de V.N. de Famalicão apresenta, na sua totalidade, ou seja, 100% das descontinuidades são diaclases. Ao analisar os tipos de descontinuidade mais frequentes nas três famílias principais, verifica-se, como seria expectável, que a totalidade das descontinuidades são diaclases.

➤ *GRAU DE FRACTURAÇÃO*

O espaçamento é caracterizado pela intensidade da fracturação num determinado volume de maciço rochoso. O espaçamento é um factor condicionante no tamanho do bloco unitário e como é uma característica muito variável no maciço, é necessário calcular a média dos valores medidos ou o valor mais provável, admitindo uma distribuição normal. Na análise geral do grau de fracturação, verifica-se com uma maior expressão, que, 43% são descontinuidades medianamente afastadas (F3), com espaçamento médio entre 20 e 60cm. A estas seguem-se, com 37% descontinuidades afastadas (F2), com 14% descontinuidades próximas (F4) e ainda com alguma expressão, 4% de descontinuidades muito afastadas (F1). Na análise das duas famílias principais, verifica-se, que a primeira família apresenta, com maior representatividade descontinuidades afastadas (F2), seguidas das descontinuidades medianamente afastadas (F3). A segunda família apresenta-se dividida em igual percentagem entre descontinuidades afastadas (F2) e medianamente afastadas (F3). Estas variações dos parâmetros geológico-geotécnicos que ocorrem entre famílias e mesmo em relação à análise geral, deve-se essencialmente, à baixa representatividade dos dados recolhidos o que provoca estas variações e que torna uma análise distorcida dos resultados. Contudo, nestes casos verifica-se que as percentagens entre os parâmetros estão muito próximos uns dos outros.

No Quadro 34 apresenta-se o espaçamento médio das descontinuidades do 1º Painei.

Quadro 34 – Espaçamento médio das descontinuidades do 1º Painel.

Famílias	Espaçamento médio	Espaçamento médio corrigido	"Fracture Intercept"
	(cm)	(cm)	(cm)
N[70º/80º[E	89	88	394
N[145º/155º[E	116	109	444
Famílias Principais	102	98	209
Restantes Famílias	61	48	111
Geral	74	64	72

➤ **CARACTERIZAÇÃO DO GRAU DE COMPARTIMENTAÇÃO DO MACIÇO**

A definição do parâmetro Fracture Intercept (Fi), recomendado pela ISRM (1981) é de extrema importância para os estudos da compartimentação do maciço rochoso. Devido à anisotropia apresentada pelo maciço rochoso é de referir que os dados que daí advêm, apresentam um elevado coeficiente de variação. Posto isto, é imprescindível fazer uma correcção do espaçamento médio das descontinuidades, a amplitude da correcção é tanto maior quanto maior for a inclinação da descontinuidade. Os valores do espaçamento médio corrigido dão a ideia da ordem de grandeza em que o maciço rochoso estará compartimentado, nunca esquecer, que estes espaçamentos são valores médios.

O sistema de famílias de descontinuidades, que é característico de uma dada zona do maciço, é designado por sistema de compartimentação. O sistema de compartimentação de um maciço rochoso pode representar-se tridimensionalmente num bloco diagrama (ISRM, 1981). A intersecção entre as famílias de descontinuidades presentes num maciço rochoso define o seu *bloco unitário*. O cálculo do bloco unitário é definido a partir dos valores obtidos nos diagramas geológico-estruturais e na média do espaçamento entre as descontinuidades.

Quadro 35 – Classificação do tamanho de blocos de material-rocha com base no índice volumétrico (ISRM, 1981).

Descrição	Jv (Descontinuidades/m ³)
Blocos muito grandes	<1
Blocos grandes	1-3
Blocos médios	3-10
Blocos pequenos	10-30
Blocos muito pequenos	>30

➤ ABERTURA

A abertura é definida como a distância média, medida na perpendicular, entre os bordos da descontinuidade (ISRM, 1978). A dimensão da abertura revela-se muito importante nos estudos relativos à permeabilidade e à resistência ao corte de um maciço rochoso. Segundo a classificação da ISRM (1978, 1981), cerca de 57% e 37% das descontinuidades são classificadas como abertas e fechadas, respectivamente. E com pouca representatividade, com 2% são descontinuidades classificadas como muito abertas.

É de referir que cada uma das classes de abertura está dividida em três subclasses, o que torna possível uma análise mais precisa. No maciço em geral, verifica-se, que as descontinuidades classificadas como “fechadas” encontram-se na sua maioria na subclasse “muito apertadas”, as descontinuidades classificadas como “abertas” encontram-se com maior representatividade na subclasse “Aberta”. Numa análise mais pormenorizada, pode-se constatar, que na primeira e segunda família as descontinuidades são na sua maioria classificadas como Abertas, sendo que o valor da abertura média é de 1,7mm e 1,1mm, respectivamente.

➤ PREENCHIMENTO

Entende-se por enchimento o material que se encontra a preencher o espaço entre as duas paredes das descontinuidades (ISRM, 1978). A espessura do enchimento depende muito da abertura da descontinuidade. A caracterização física e mecânica do material de enchimento é de extrema importância, pois a sua permeabilidade e espessura condicionam as características de percolação nas descontinuidades, assim como a sua resistência, deformabilidade e espessura condicionam todo o processo de rotura. Numa análise geral do maciço, pode-se constatar que 49% das descontinuidades são preenchidas por material esmagado, por outro lado, 31% das descontinuidades cartografadas não possui qualquer tipo de preenchimento. Ainda, com alguma expressão, encontram-se os preenchimentos com argila “mole” (16%) e argila “dura” (4%). Na

análise das famílias, verifica-se que o preenchimento da primeira família se divide entre material esmagado e descontinuidades sem qualquer tipo de enchimento. Enquanto, a segunda família se divide entre material esmagado e argila “mole”.

➤ *RUGOSIDADE*

A rugosidade manifesta-se pela presença de irregularidades nas paredes das descontinuidades, podendo estas ser de diferentes tipos e de diferentes ordens (ISRM, 1978). A rugosidade nas descontinuidades traduz na prática como um aumento da resistência de corte ao longo da superfície da descontinuidade e introduzem perturbações na percolação das águas. A rugosidade é um dos factores que mais influência a variação da abertura ao longo de uma descontinuidade. Numa abordagem geral, a rugosidade com mais expressão é do tipo ondulada com 53% das descontinuidades, logo de seguida, com 45% tem-se as descontinuidades com rugosidade do tipo plana. É de salientar que as três classes definidas para a rugosidade podem-se subdividir em três subclasses cada. Tanto na classe ondulada como na classe plana destaca-se a subclasse lisa a algo rugosa (R1-2). Numa análise pormenorizada, na primeira e segunda família a rugosidade predominante é do tipo plana, sendo que a subclasse se mantém entre ambas em lisa a algo rugosa (R1-2). Como se pode constatar, na análise geral, a rugosidade apresenta-se praticamente dividida entre descontinuidades onduladas e planas. Este simples facto pode explicar a existência de variações nos parâmetros geológico-geotécnicos entre as diferentes análises.

➤ *CONTINUIDADE*

A continuidade caracteriza a extensão em área de uma descontinuidade num dado volume de rocha. O estudo da continuidade das descontinuidades numa bancada pode ter um factor de distorção que é a própria altura da bancada (K), por esse motivo a leitura da continuidade das descontinuidades poderá ser complementada pelo seguinte parâmetro: a terminação. Assim, um grande número de descontinuidades terminadas em rocha, indicará à partida, uma menor continuidade das mesmas, pelo contrário, se uma descontinuidade termina no obscuro, pode indicar, uma maior continuidade das mesmas. É de salientar que a bancada onde se realizou este estudo tinha uma altura máxima de 10m. Posto isto, pode-se constatar, que as descontinuidades medidas, são geralmente muito pouco contínuas (< 1m) a pouco contínuas (1-3m), com 37% e 35% respectivamente, as restantes 27% de descontinuidades classificam-se como medianamente contínuas (3-10m). O valor médio da extensão da descontinuidade é de 4,4m na generalidade do maciço. Como seria de esperar não existem descontinuidades medidas com mais de 10m de extensão. Numa análise pormenorizada, pode-se verificar uma ligeira diferença, as descontinuidades da primeira família apresentam-se medianamente contínuas, seguidas de muito

pouco contínuas e por fim pouco contínuas. A segunda família apresenta-se na sua maioria pouco contínuas, seguida de medianamente contínua e muito pouco contínua. A desigualdade entre as diferentes análises pode ser explicada pela proximidade das percentagens dos parâmetros medidos.

➤ *TERMINAÇÃO*

Numa análise geral do maciço, verifica-se que 73% da terminação das descontinuidades é noutra descontinuidade, 24% com terminação no obscuro, sendo que os restantes 2% terminam na rocha. Na análise por famílias, verifica-se uma ligeira alteração, na primeira família as descontinuidades terminam no obscuro, seguidas com terminação noutra descontinuidade. Na segunda família, com grande representatividade, as descontinuidades que terminam noutra descontinuidade, seguidas de descontinuidades que terminam no obscuro. A diferença existente na análise da primeira família com as outras análises pode ser explicada devido à proximidade das percentagens entre os dois parâmetros.

➤ *CURVATURA*

Em termos globais, a curvatura das descontinuidades é fundamentalmente do tipo planas a ligeiramente curvas (C1-2), com cerca de 73%, seguidas de 22% de descontinuidades curvas (C3) e com pouca expressão de descontinuidades muito curvas (C4-5). Na análise das famílias verifica-se que não existem diferenças significativas na distribuição das descontinuidades em relação à análise geral do maciço.

➤ *PRESENÇA DE ÁGUA*

As descontinuidades apresentam-se maioritariamente húmidas com cerca de 80%, com 18% das descontinuidades apresentam-se secas e com apenas 2% das descontinuidades são gotejantes. Esta última situação pode estar relacionada com a precipitação que ocorreu nos dias anteriores. Na análise das famílias verifica-se que não existem diferenças significativas na distribuição das descontinuidades em relação à análise geral do maciço.

No Quadro 36 é apresentado o quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos no 1º Painel.

Quadro 36- Quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos no 1º Painei.

Parâmetro	1ª Família	2ªBancada	Família Principais	Restantes Famílias	Geral
Grau de alteração	W1-2	W1-2	W1-2	W1-2	W1-2
Tipo de descontinuidades	Diaclases	Diaclases	Diaclases	Diaclases	Diaclases
Grau de fracturação	F2	F2/F3	F2	F3	F3
Abertura	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta
Tipo de preenchimento	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado
Rugosidade	Plana	Plana	Plana	Ondulada	Ondulada
	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2
Continuidade	Medianamente contínua	Pouco contínua	Medianamente contínua	Muito pouco contínua	Muito pouco contínua
Terminação	Obscuro	Descontinuidade	Descontinuidade	Descontinuidade	Descontinuidade
Curvatura	C1-2	C1-2	C1-2	C1-2	C1-2
Presença de água	Húmido	Húmido	Húmido	Húmido	Húmido

2º Painel

A técnica de amostragem linear utilizada no terreno permitiu cartografar no 2º Painel, 47 descontinuidades numa extensão de 38,50m (Figura 66). Neste 2º Painel realizou-se o levantamento geológico, geotécnico e geomecânico do maciço, bem como, a análise pormenorizada das descontinuidades que intersectavam os furos.



Figura 66 – Frente da bancada do 2º Painel.

As 47 descontinuidades medidas no terreno através da aplicação da técnica de amostragem linear foram tratadas do ponto de vista da sua orientação espacial, posteriormente analisadas em estereogramas e diagrama de rosetas, permitindo a definição do número e atitude das famílias principais de descontinuidades.

A análise dos diagramas geológico-estruturais do 2º Painel, permite aferir que as descontinuidades se concentram em duas famílias principais (Figura 67 e 68): a mais representativa N135º-145ºE, com inclinações que variam entre 75º-85º para NE e a segunda família N60º-70ºE, com pendores que oscilam entre 65º-75º para SE.

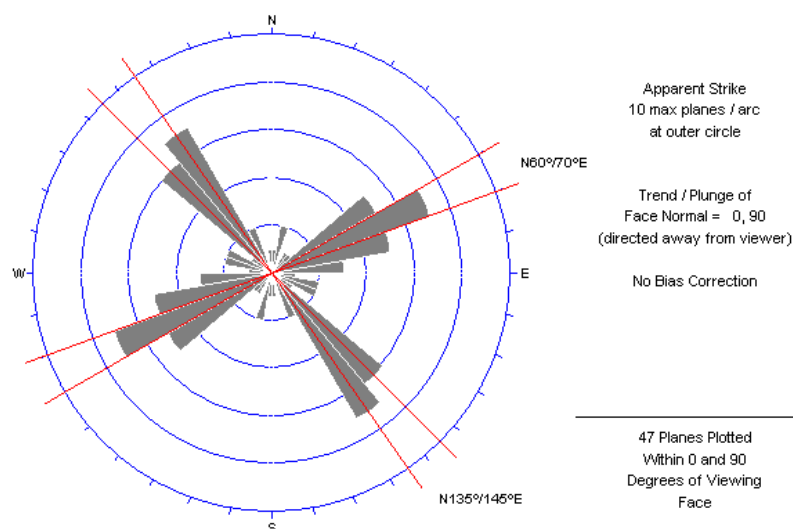


Figura 67 - Diagrama de rosetas do 2ºPainel, com 47 descontinuidades, projectadas em intervalos (pétalas) com 10º de amplitude.

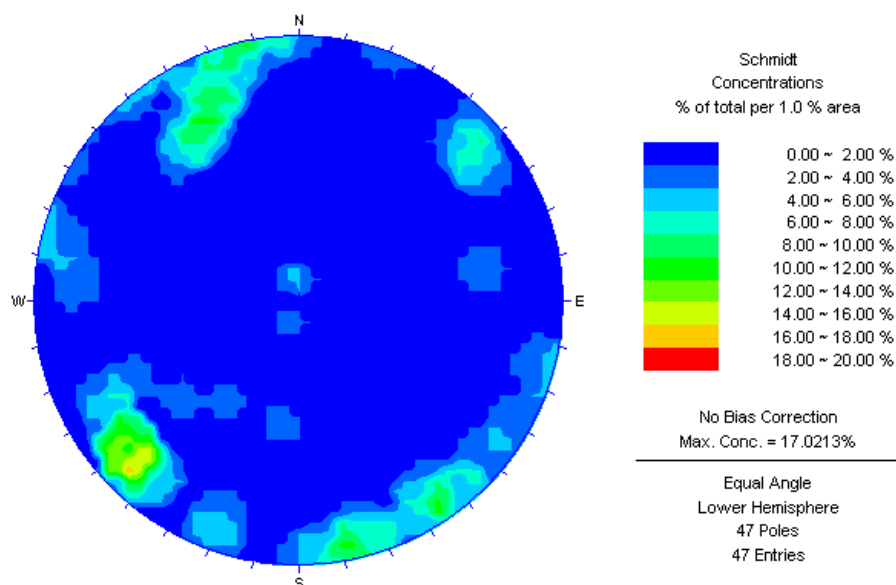
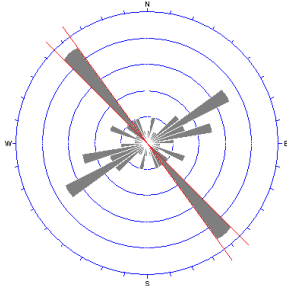
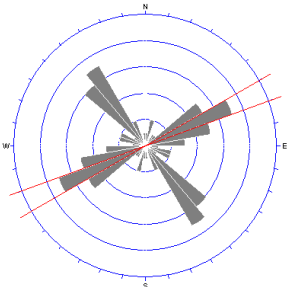


Figura 68 - Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 47 descontinuidades medidas no 2º Painel.

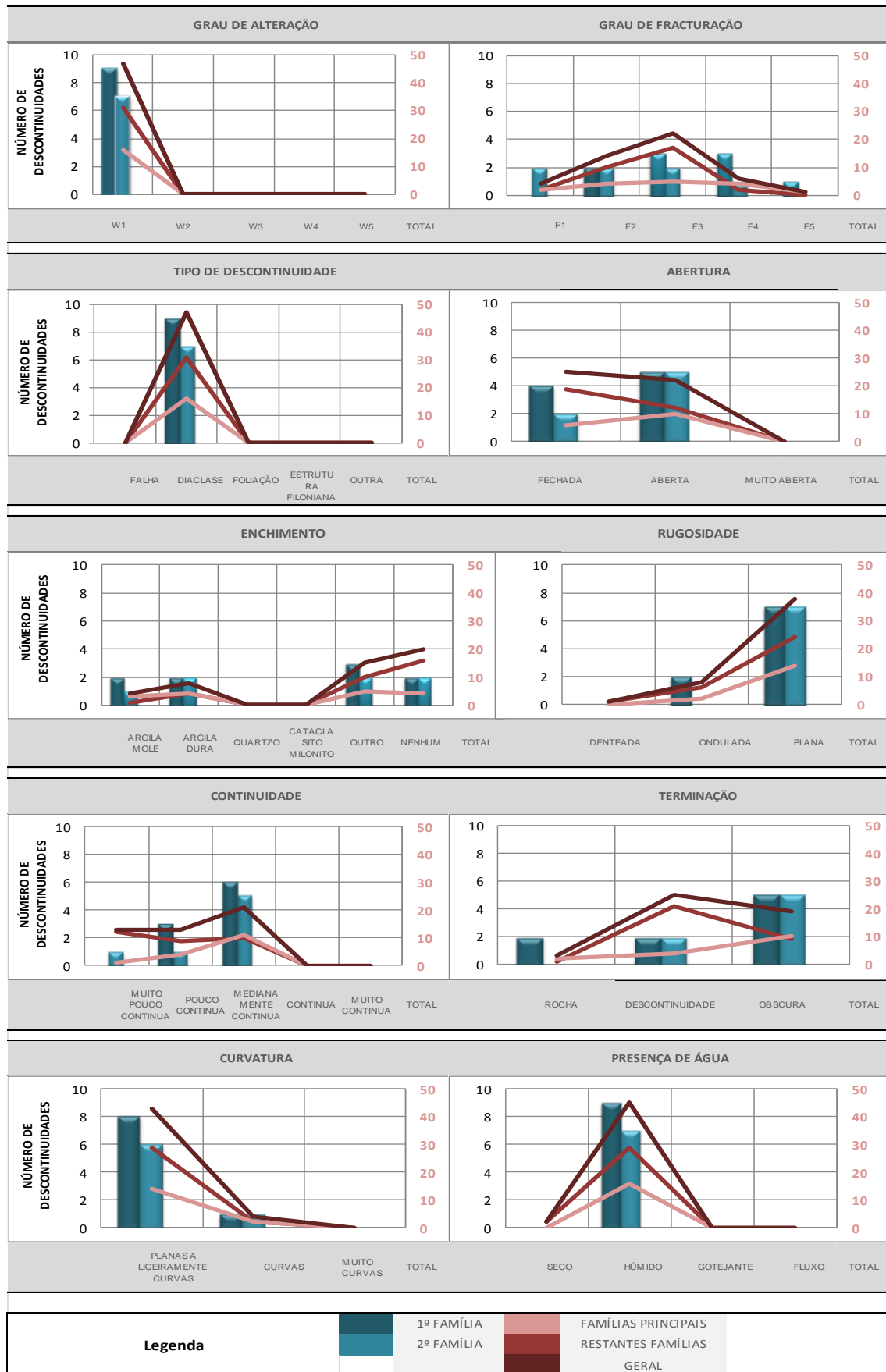
A partir do Quadro 37 pode-se visualizar de uma forma individualizada as famílias principais de descontinuidades com o respectivo diagrama de rosetas, bem como o número e a percentagem de descontinuidades contempladas em cada família. Verifica-se que 34%, ou seja, 16 das 47 descontinuidades estão contempladas em famílias, sendo que dessas 16 descontinuidades, 56,3% estão inseridas na 1ª família e a 2ª família é representada por 43,8% das descontinuidades, sendo que os restantes 66% são referentes a descontinuidades dispersas.

Quadro 37 - Síntese dos dados geológico-estruturais do 2ºPainel.

Família	Direcção	Direcção média	Inclinação média	Diagrama de Rosetas	Número de descontinuidades	
1ª	N[135º/145º]E	N138ºE	79º NE		9	56,3%
2ª	N[60º/70º]E	N62ºE	69º SE		7	43,8%
Intervalo - 10º					16	34%

No Quadro 38 é apresentado toda a estatística referente aos parâmetros geológico-geotécnicos medidos no 2º Painel da pedreira de V.N. de Famalicão. Em cada gráfico é representado o número de descontinuidades para a primeira e segunda família, para as principais famílias, para as restantes famílias e para a totalidade das descontinuidades medidas.

Quadro 38 – Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos do 2º Painel



➤ *GRAU DE ALTERAÇÃO*

Em toda a sua extensão, o maciço rochoso apresenta-se são a ligeiramente alterado, W1-2, (100%). Devido ao maciço ser muito pouco alterado, o material-rocha apresenta globalmente uma tonalidade acinzentada. Na análise do grau de alteração das principais famílias, constatou-se que não se verificam variações em relação à análise geral, ou seja, predomina um maciço são a ligeiramente alterado (W1-2).

➤ *TIPO DE DESCONTINUIDADE*

O maciço rochoso da pedreira de V.N. de Famalicão apresenta, na sua totalidade, ou seja, 100% das descontinuidades são diaclases. Ao analisar os tipos de descontinuidade mais frequentes das três famílias principais, verifica-se, como seria expectável, que a totalidade das descontinuidades são diaclases.

➤ *GRAU DE FRACTURAÇÃO*

Na análise geral do grau de fracturação, verifica-se com uma maior expressão, que, 45% são descontinuidades medianamente afastadas (F3), com espaçamento médio entre 20 e 60cm. A estas seguem-se, com 30% descontinuidades afastadas (F2), com 13% descontinuidades próximas (F4) e ainda com alguma expressão, com 9% e 2% descontinuidades muito afastadas (F1) e muito próximas (F5), respectivamente. Na análise das duas famílias principais, verifica-se, que a primeira família apresenta, com igual percentagem descontinuidades próximas (F4) e medianamente afastadas (F3), seguidas das descontinuidades afastadas (F2). Enquanto, a segunda família apresenta, com igual percentagem descontinuidades medianamente afastadas (F3) e afastadas (F2). Apesar de todas as famílias de descontinuidades se apresentarem divididas entre os diferentes parâmetros, pode-se constatar que em todas elas apresentam descontinuidades medianamente afastadas (F3), tal como se verifica na análise geral.

No Quadro 39 é apresentado o espaçamento médio das descontinuidades do 2º Painel.

Quadro 39 – Espaçamento médio das descontinuidades do 2º Painel.

Famílias	Espaçamento médio	Espaçamento médio corrigido	"Fracture Intercept"
	(cm)	(cm)	(cm)
N[135º/145º]E	43	43	428
N[60º/70º]E	141	120	550
Famílias Principais	86	76	241
Restantes Famílias	82	74	124
Geral	84	75	82

➤ ABERTURA

Segundo a classificação da ISRM (1978, 1981), cerca de 53% e 47% das descontinuidades são classificadas como fechadas e abertas, respectivamente. É de referir que cada uma das classes de abertura está dividida em três subclasses, o que torna possível uma análise mais precisa. No maciço em geral, verifica-se, que as descontinuidades classificadas como “fechadas” encontram-se na sua maioria na subclasse “muito apertadas”, as descontinuidades classificadas como “abertas” encontram-se com maior representatividade na subclasse “Aberta”. Numa análise mais pormenorizada, pode-se constatar, que na primeira e segunda família as descontinuidades são na sua maioria classificadas como Abertas, sendo que o valor da abertura média é de 1,3mm e 1,8mm, respectivamente. A diferença existente entre as famílias principais e a análise geral, deve-se ao facto da proximidade do número de descontinuidades contempladas em cada parâmetro.

➤ PREENCHIMENTO

Numa análise geral do maciço, pode-se constatar que 43% das descontinuidades não possui qualquer tipo de enchimento, por outro lado, 32% das descontinuidades cartografadas estão preenchidas por material esmagado. Ainda, com alguma expressão os preenchimentos com argila “mole” (17%) e argila “dura” (9%). Na análise das famílias, verifica-se que o preenchimento da primeira e segunda família se divide entre material esmagado, argila “dura”, argila “mole” e descontinuidades sem qualquer tipo de enchimento.

➤ *RUGOSIDADE*

Numa abordagem geral, a rugosidade com mais expressão é do tipo plana com 81% das descontinuidades, logo de seguida, com 17% as descontinuidades com rugosidade do tipo ondulada e com pouco expressão, cerca de 2% descontinuidades com rugosidade do tipo denteada. É de salientar que as três classes definidas para a rugosidade podem-se subdividir em três subclasses cada. Posto isto, em ambas as classes destaca-se a subclasse lisa a algo rugosa (R1-2). Numa análise pormenorizada, na primeira e segunda família a rugosidade predominante é do tipo plana, sendo que a subclasse entre ambas é lisa a algo rugosa (R1-2).

➤ *CONTINUIDADE*

É de salientar que a bancada onde se realizou este estudo tinha uma altura máxima de 10m. Posto isto, pode-se constatar, que as descontinuidades medidas, são geralmente medianamente contínuas (3-10m), com 45% das descontinuidades, de seguida, com igual percentagem, com cerca de 22% cada, as descontinuidades muito pouco contínuas (<1m) e pouco contínuas (1-3m). O valor médio da extensão da descontinuidade é de 4,6m na generalidade do maciço. Como seria de esperar não existem descontinuidades medidas com mais de 10m de extensão. Numa análise pormenorizada, as descontinuidades da primeira família apresentam-se medianamente contínuas, seguidas de pouco contínuas. A segunda família apresenta-se na sua maioria medianamente contínuas, seguida com igual percentagem descontinuidades pouco contínua e muito pouco contínua. A diferença existente entre a terceira família e as restantes, pode ser explicada devido à baixa representatividade das descontinuidades que são contempladas nesta família.

➤ *TERMINAÇÃO*

Numa análise geral do maciço, verifica-se que 53% da terminação das descontinuidades é noutra descontinuidade, 40% com terminação obscura, sendo que os restantes 6% terminam na rocha. Na análise por famílias, verifica-se uma ligeira alteração, na primeira e segunda família as descontinuidades terminam no obscuro, seguidas com terminação noutra descontinuidade.

➤ *CURVATURA*

Em termos globais, a curvatura das descontinuidades é fundamentalmente do tipo plana a ligeiramente curva (C1-2), com cerca de 91%, seguidas de 9% de descontinuidades curvas (C3). Na análise das famílias verifica-se que não existem diferenças significativas na distribuição das descontinuidades em relação à análise geral do maciço.

➤ *PRESENÇA DE ÁGUA*

As descontinuidades apresentam-se maioritariamente húmidas em cerca de 96%, com 4% das descontinuidades a apresentarem-se secas. O simples facto das descontinuidades apresentarem-se húmidas pode estar relacionada com a precipitação que ocorreu nos dias anteriores. Na análise das famílias verifica-se que não existem diferenças significativas na distribuição das descontinuidades em relação à análise geral do maciço.

No Quadro 40 é apresentado o quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos no 2º Painel.

Quadro 40- Quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos no 2º Painel.

Parâmetro	1ª Família	2ª Bancada	Família Principais	Restantes Famílias	Geral
Grau de alteração	W1-2	W1-2	W1-2	W1-2	W1-2
Tipo de descontinuidades	Diaclase	Diaclase	Diaclase	Diaclase	Diaclase
Grau de fracturação	F3/F4	F1/F2/F3	F3	F3	F3
Abertura	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada
Tipo de preenchimento	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado	Nenhum	Nenhum
Rugosidade	Plana	Plana	Plana	Plana	Plana
	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2
Continuidade	Medianamente contínua	Medianamente contínua	Medianamente contínua	Muito pouco contínua	Medianamente contínua
Terminação	Obscuro	Obscuro	Obscuro	Descontinuidade	Descontinuidade
Curvatura	C1-2	C1-2	C1-2	C1-2	C1-2
Presença de água	Húmido	Húmido	Húmido	Húmido	Húmido

3º Painel

A técnica de amostragem linear utilizada no terreno permitiu cartografar no 3º Painel, 31 descontinuidades numa extensão de 24,70m (Figura 69). Neste 3º Painel realizou-se o levantamento geológico, geotécnico e geomecânico do maciço, bem como, a análise pormenorizada das descontinuidades que intersectavam os furos.



Figura 69 – Frente da bancada do 3º Painel.

As 31 descontinuidades medidas no terreno através da aplicação da técnica de amostragem linear foram tratadas do ponto de vista da sua orientação espacial, posteriormente analisadas em estereogramas e diagrama de rosetas, permitindo a definição do número e atitude das famílias principais de descontinuidades.

A análise dos diagramas geológico-estruturais do 3º Painel, permite aferir que as descontinuidades se concentram em duas famílias principais (Figura 70 e 71): a mais representativa N130º-140ºE, com inclinações que variam entre 75º-85º para NE e a segunda família N60º-70ºE, com pendores que oscilam entre 75º-85º para SE.

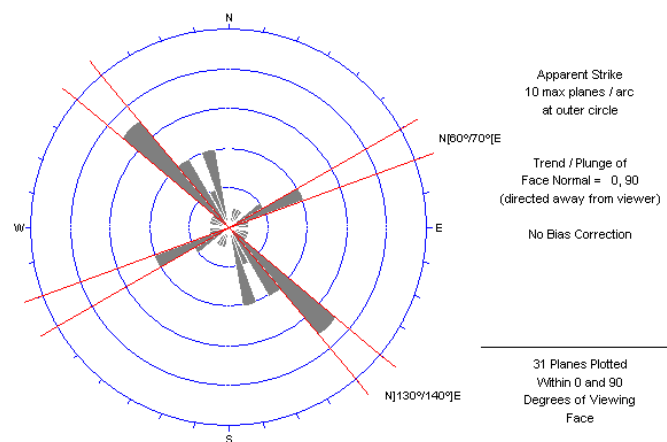


Figura 70 - Diagrama de rosetas do 3º Painel, com 31 descontinuidades, projectadas em intervalos (pétalas) com 10º de amplitude.

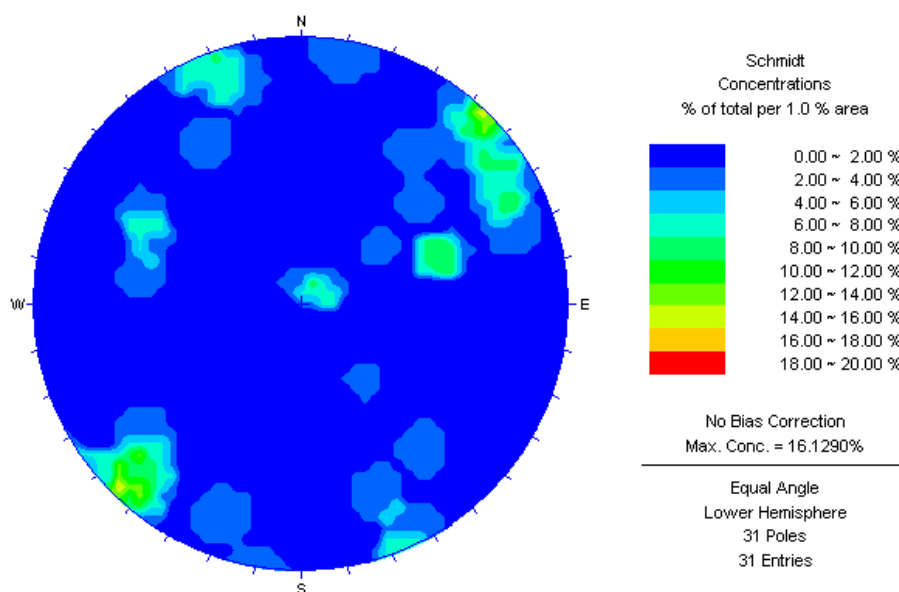
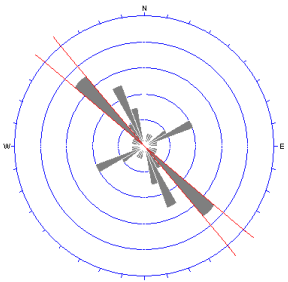
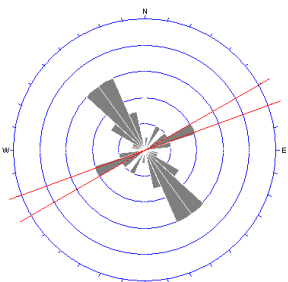


Figura 71 - Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 31 descontinuidades medidas no 3º Painel.

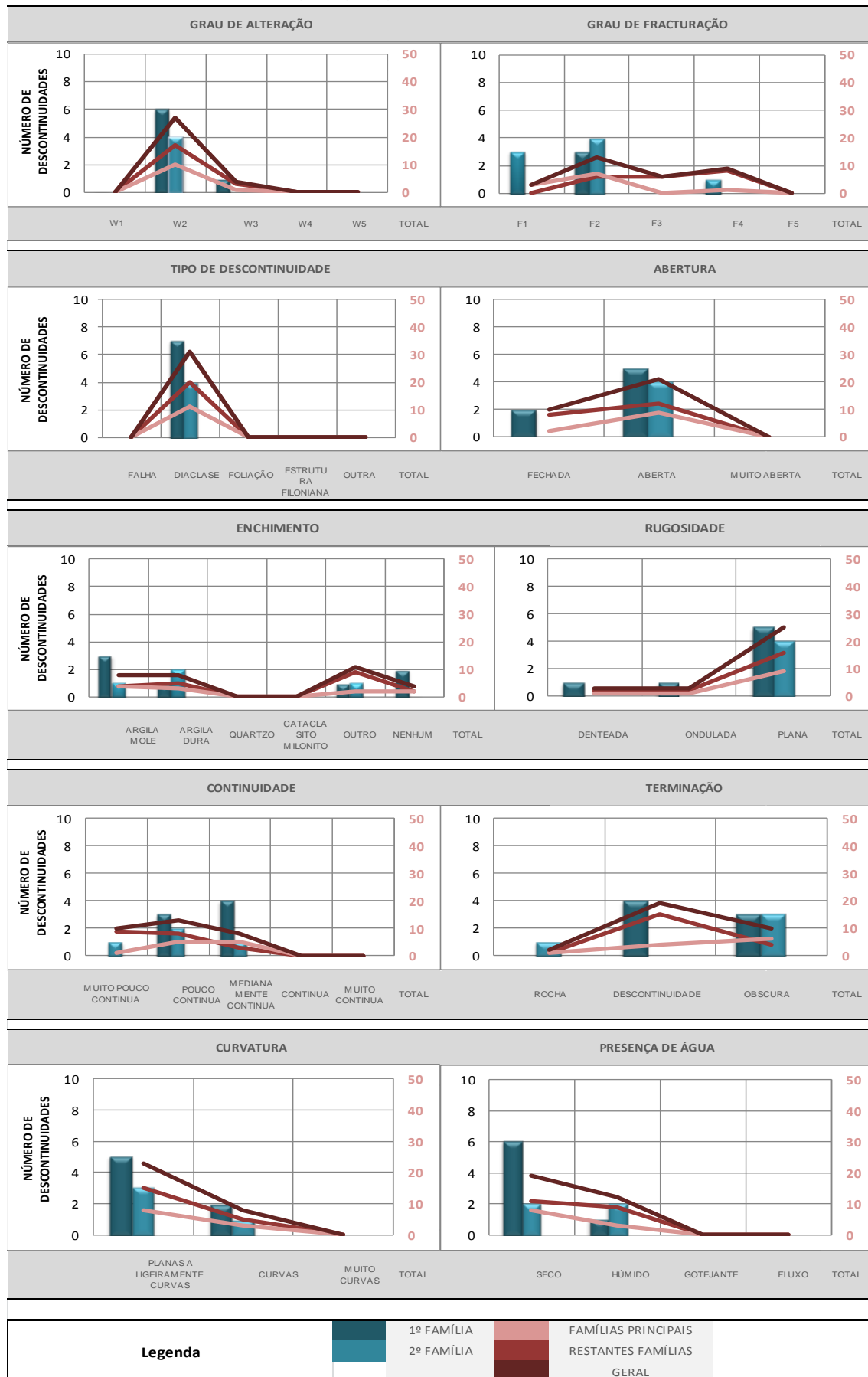
A partir do Quadro 41 pode-se visualizar de uma forma individualizada as famílias principais de descontinuidades com o respectivo diagrama de rosetas, bem como o número e a percentagem de descontinuidades contempladas em cada família. Verifica-se que 35%, ou seja, 11 das 31 descontinuidades estão contempladas em famílias, sendo que dessas 11 descontinuidades, 63,6% estão inseridas na 1ª família e a 2ª família é representada por 36,4% das descontinuidades, sendo que os restantes 65% são referentes a descontinuidades dispersas.

Quadro 41- Síntese dos dados geológico-estruturais do 3ºPainel.

Família	Direcção	Direcção média	Inclinação média	Diagrama de Rosetas	Número de descontinuidades	
1ª	N]130º/140º]E	N136ºE	79º NE		7	63,6%
2ª	N[60º/70º[E	N65ºE	80º SE		4	36,4%
Intervalo - 10º					11	35%

No Quadro 42 é apresentado toda a estatística referente aos parâmetros geológico-geotécnicos medidos no 3º Painel da pedreira de V.N. de Famalicão. Em cada gráfico é representado o número de descontinuidades para a primeira e segunda família, para as principais famílias, para as restantes famílias e para a totalidade das descontinuidades medidas.

Quadro 42 – Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos do 3º Painel



➤ *GRAU DE ALTERAÇÃO*

Na sua maioria, o maciço rochoso apresenta-se são a ligeiramente alterada, W1-2, (87%), com um reduzido número de descontinuidades moderadamente alteradas, W3, (13%). Devido ao maciço apresentar-se muito pouco alterado, o material-rocha apresenta globalmente uma tonalidade cinzenta. Na análise do grau de alteração nas principais famílias, constatou-se que não se verificam variações em relação à análise geral, ou seja, predomina um maciço são a ligeiramente alterada (W1-2).

➤ *TIPO DE DESCONTINUIDADE*

O maciço rochoso da pedreira de V.N. de Famalicão apresenta, na sua totalidade, ou seja, 100% das descontinuidades são diaclases. Ao analisar os tipos de descontinuidade mais frequentes das três famílias principais, verifica-se, como seria expectável, que a sua totalidade são diaclases.

➤ *GRAU DE FRACTURAÇÃO*

Na análise geral do grau de fracturação, verifica-se com uma maior expressão, que, 42% das descontinuidades são afastadas (F2), com espaçamento médio entre 60 e 200cm. A estas seguem-se, com 29% descontinuidades próximas (F4), com 19% descontinuidades medianamente afastadas (F3) e ainda com alguma expressão, com 10% descontinuidades muito afastadas (F1). Na análise das duas famílias principais, verifica-se, que a primeira família apresenta, com igual percentagem descontinuidades muito afastadas (F1) e afastadas (F2), seguidas das descontinuidades próximas (F4). Enquanto, a segunda família apresenta na sua totalidade descontinuidades afastadas (F2). A diferença dos dados obtidos nas diferentes famílias, deve-se à baixa representatividade das descontinuidades que são contempladas em ambas as famílias, o que torna os resultados, por vezes, contraditórios e distorcidos do real.

No Quadro 43 é apresentado o espaçamento médio das descontinuidades do 3º Painel.

Quadro 43 – Espaçamento médio das descontinuidades do 3º Painel.

Famílias	Espaçamento médio	Espaçamento médio corrigido	"Fracture Intercept"
	(cm)	(cm)	(cm)
N]130º/140º]E	159	153	353
N[60º/70º[E	119	116	618
Famílias Principais	143	139	225
Restantes Famílias	53	45	124
Geral	84	77	80

➤ **ABERTURA**

Segundo a classificação da ISRM (1978, 1981), cerca de 68% e 32% das descontinuidades são classificadas como abertas e fechadas, respectivamente. É de referir que cada uma das classes de abertura está dividida em três subclasses, o que torna possível uma análise mais precisa. No maciço em geral, verifica-se, que as descontinuidades classificadas como “fechadas” encontram-se na sua maioria na subclasse “muito apertadas”, as descontinuidades classificadas como “abertas” encontram-se com maior representatividade na subclasse “Aberta”. Numa análise mais pormenorizada, pode-se constatar, que a primeira e segunda família as descontinuidades são na sua maioria classificadas como Abertas, sendo que o valor da abertura média em ambas é de 0,9mm.

➤ **PREENCHIMENTO**

Numa análise geral do maciço, pode-se constatar que 35% das descontinuidades estão preenchidas por material esmagado, por outro lado, com 26% cada, as descontinuidades preenchidas com argila “dura” e argila “mole”. Ainda, com alguma expressão, com 13% descontinuidades que não possui qualquer tipo de enchimento. Na análise por famílias, verifica-se que o preenchimento da primeira família é de argila “dura”. Enquanto, a segunda família é preenchida por argila “mole”. Verifica-se uma ligeira diferença dos resultados obtidos em cada família e na análise geral. Contudo, na análise realizada é possível constatar uma equidade nas percentagens entre os parâmetros medidos, e a aliar a baixa representatividade das descontinuidades nas famílias, contribuí para a inexistência de uma relação constante entre os parâmetros.

➤ *RUGOSIDADE*

Numa abordagem geral, a rugosidade com mais expressão são do tipo plana com 81% das descontinuidades, logo de seguida, com igual percentagem, com 10% cada, as descontinuidades com rugosidade do tipo ondulada e do tipo denteada. É de salientar que as três classes definidas para a rugosidade podem-se subdividir em três subclasses cada. Posto isto, em ambas as classes destaca-se a subclasse lisa a algo rugosa (R1-2). Numa análise pormenorizada, as duas famílias possui uma rugosidade do tipo plana, sendo que a subclasse se mantém entre ambas em lisa a algo rugosa (R1-2).

➤ *CONTINUIDADE*

É de salientar que a bancada onde se realizou este estudo tinha uma altura máxima de 10m. Posto isto, pode-se constatar, que as descontinuidades medidas, são geralmente pouco contínuas (1-3m), com 42% das descontinuidades, de seguida, com cerca de 32%, as descontinuidades muito pouco contínuas (<1m) e com 26% descontinuidades medianamente contínuas (3-10m). O valor médio da extensão da descontinuidade é de 4,2m na generalidade do maciço. Como seria de esperar não existem descontinuidades medidas com mais de 10m de extensão. Numa análise pormenorizada, as descontinuidades da primeira família apresentam-se medianamente contínuas, seguidas de pouco contínuas. A segunda família apresenta-se na sua maioria pouco contínuas, seguida com igual percentagem descontinuidades muito pouco contínua e medianamente contínua.

➤ *TERMINAÇÃO*

Numa análise geral do maciço, verifica-se que 61% da terminação das descontinuidades é noutra descontinuidade, 32% com terminação obscura, sendo que os restantes 6% terminam na rocha. Na análise por famílias, verifica-se que a primeira família as descontinuidades terminam noutra descontinuidade, seguidas com terminação no obscuro. Na segunda família, a maioria das descontinuidades terminam no obscuro, seguidas de descontinuidades que terminam na rocha.

➤ *CURVATURA*

Em termos globais, a curvatura das descontinuidades é fundamentalmente do tipo plana a ligeiramente curva (C1-2), com cerca de 74%, seguidas de 26% de descontinuidades curvas (C3). Na análise das famílias verifica-se que não existem diferenças significativas na distribuição das descontinuidades em relação à análise geral do maciço.

➤ **PRESENÇA DE ÁGUA**

As descontinuidades apresentam-se maioritariamente secas com cerca de 61%, com 39% das descontinuidades apresentam-se húmidas. Na análise das famílias verifica-se que apenas a primeira família não apresenta diferenças significativas na distribuição das descontinuidades em relação à análise geral do maciço, sendo que a segunda família apresenta-se dividida com igual percentagem entre descontinuidades secas e húmidas.

No Quadro 44 é apresentado o quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos no 3º Painel.

Quadro 44- Quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos no 3º Painel.

Parâmetro	1ª Família	2ª Bancada	Família Principais	Restantes Famílias	Geral
Grau de alteração	W1-2	W1-2	W1-2	W1-2	W1-2
Tipo de descontinuidades	Diaclase	Diaclase	Diaclase	Diaclase	Diaclase
Grau de fracturação	F1/F2	F2	F2	F4	F2
Abertura	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta
Tipo de preenchimento	Argila dura	Argila mole	Argila dura	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado
Rugosidade	Plana	Plana	Plana	Plana	Plana
	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2
Continuidade	Medianamente contínua	Pouco contínua	Pouco a medianamente contínua	Muito pouco contínua	Pouco contínua
Terminação	Descontinuidade	Obscuro	Obscuro	Descontinuidade	Descontinuidade
Curvatura	C1-2	C1-2	C1-2	C1-2	C1-2
Presença de água	Seco	Seco a Húmido	Seco	Seco	Seco

Análise Geral

Na análise geral, juntaram-se as bases de dados referentes aos três painéis e apenas se realizou a análise e interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos do maciço. Assim, com 127 descontinuidades medidas no terreno através da aplicação da técnica de amostragem linear foram tratadas do ponto de vista da sua orientação espacial, posteriormente analisadas em estereogramas e diagrama de rosetas, permitindo a definição do número e atitude das famílias principais de descontinuidades.

A análise dos diagramas geológico-estruturais com a junção dos 3 painéis medidos, permitiu aferir que as descontinuidades se concentram em duas famílias principais (Figura 72 e 73): a mais representativa N139°-149°E, com inclinações que variam entre 70°-80° para NE e a segunda família N74°-84°E, com pendores que oscilam entre 75°-85° para SE.

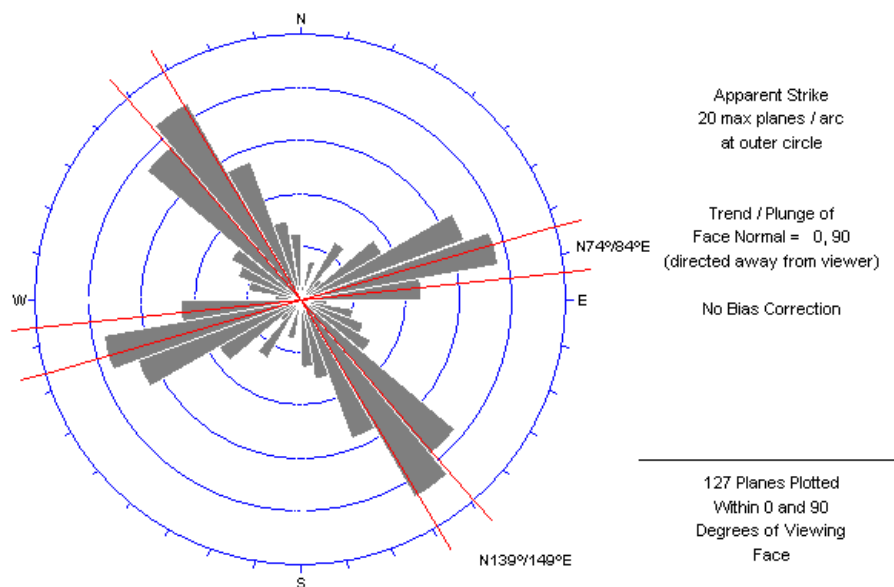


Figura 72 - Diagrama de rosetas da análise geral, com 127 descontinuidades, projectadas em intervalos (pétalas) com 10° de amplitude.

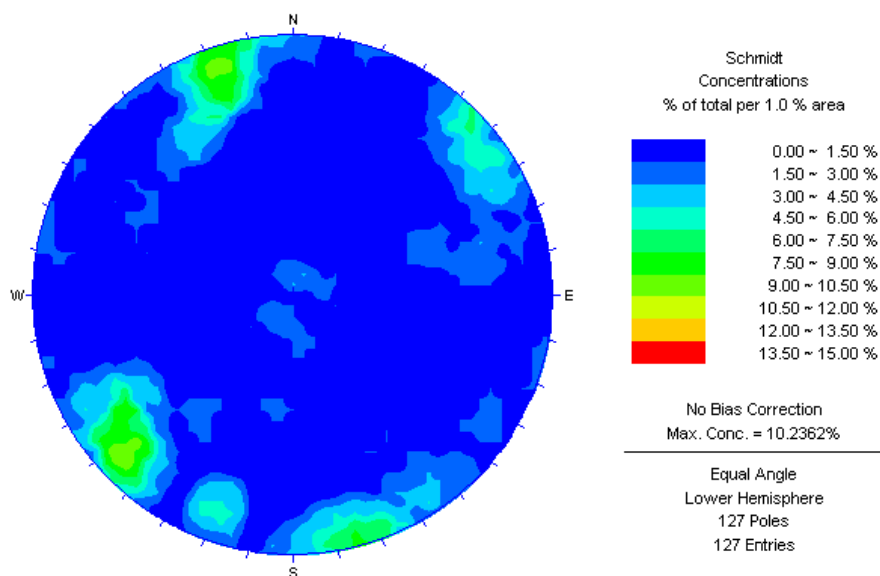
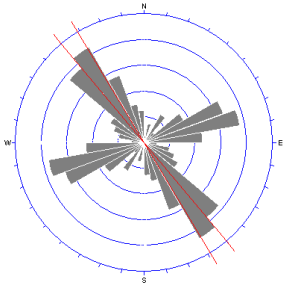
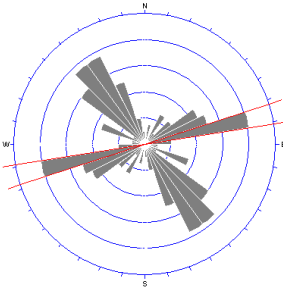


Figura 73 - Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico de 127 descontinuidades.

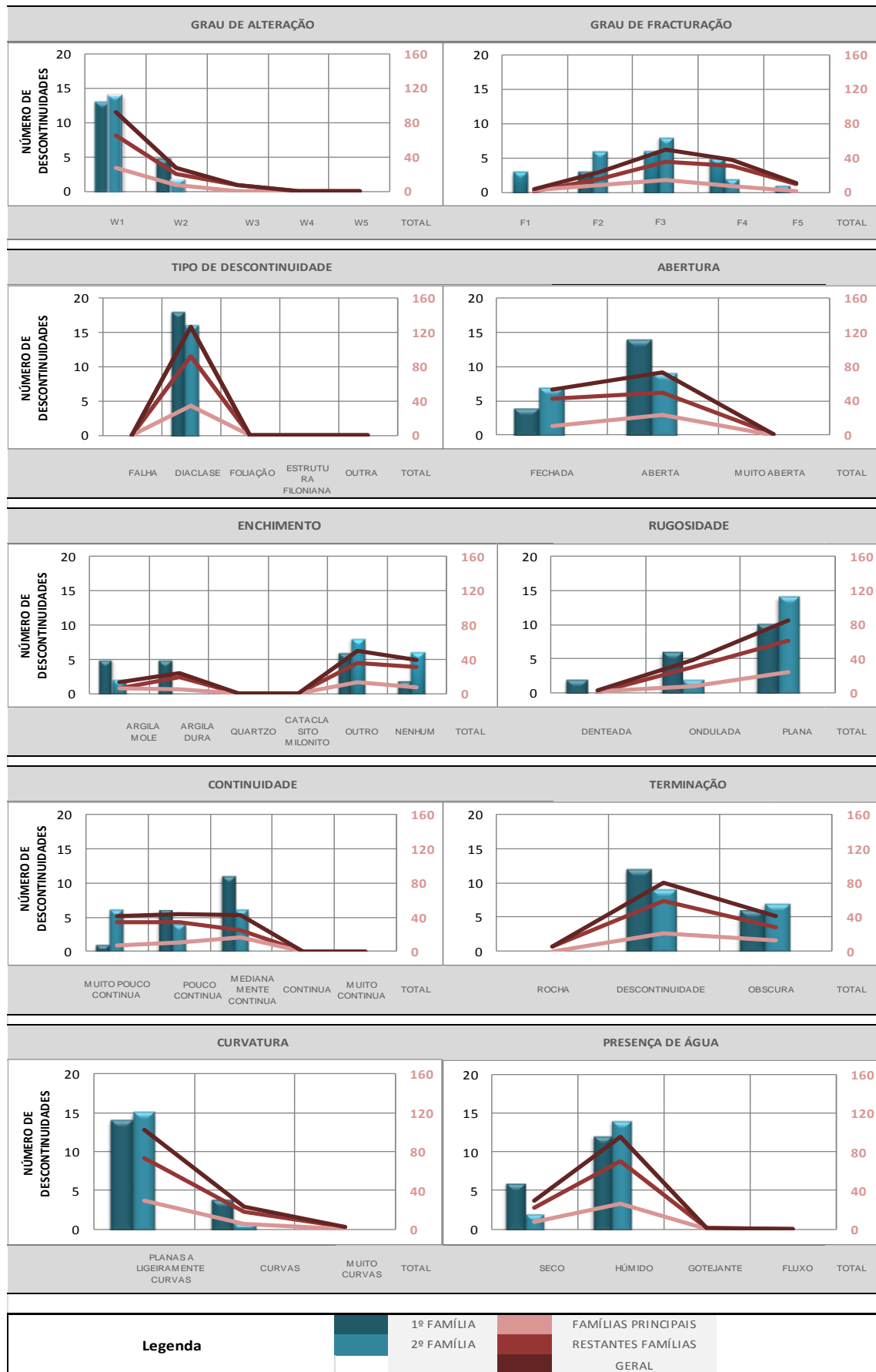
A partir do Quadro 45 pode-se visualizar de uma forma individualizada as famílias principais de descontinuidades com o respectivo diagrama de rosetas, bem como o número e a percentagem de descontinuidades contempladas em cada família. Verifica-se que 27%, ou seja, 34 das 127 descontinuidades estão contempladas em famílias, sendo que dessas 34 descontinuidades, 52,9% estão inseridas na 1ª família e a 2ª família é representada por 47,1% das descontinuidades, sendo que os restantes 73% são referentes a descontinuidades dispersas.

Quadro 45 - Síntese dos dados geológico-estruturais da análise geral.

Família	Direcção	Direcção média	Inclinação média	Diagrama de Rosetas	Número de descontinuidades	
1ª	N[139º/149º]E	N143ºE	75º NE		18	52,9%
2ª	N[74º/84º]E	N77ºE	71º SE		16	47,1%
Intervalo - 10º					34	27%

No Quadro 46 é apresentado toda a estatística referente aos parâmetros geológico-geotécnicos medidos no 3º Painel da pedreira de V.N. de Famalicão. Em cada gráfico é representado o número de descontinuidades para a primeira e segunda família, para as principais famílias, para as restantes famílias e para a totalidade das descontinuidades medidas.

Quadro 46 – Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos da análise geral.



➤ *GRAU DE ALTERAÇÃO*

Na sua maioria, o maciço rochoso apresenta-se são a ligeiramente alterado, W1-2, (94%), com pouca expressão, cerca de 6% maciço moderadamente alteradas, W3. Devido ao maciço apresentar-se muito pouco alterado, o material-rocha apresenta globalmente uma tonalidade cinzenta. Na análise do grau de alteração nas principais famílias, constatou-se que não se verificam variações em relação à análise geral, ou seja, predomina um maciço são a ligeiramente alterado (W1-2).

➤ *TIPO DE DESCONTINUIDADE*

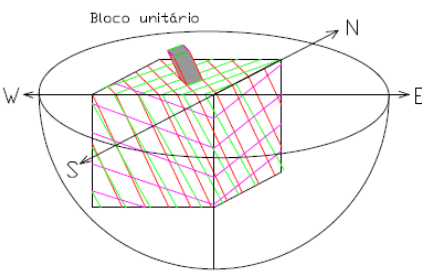
O maciço rochoso da pedreira de V.N. de Famalicão apresenta, na sua totalidade, ou seja, 100% das descontinuidades são diaclases. Ao analisar os tipos de descontinuidade mais frequentes das três famílias principais, verifica-se, como seria expectável, que a sua totalidade são diaclases.

➤ *GRAU DE FRACTURAÇÃO*

Na análise geral do grau de fracturação, verifica-se com alguma expressão, que, 39% das descontinuidades são medianamente afastadas (F3), com espaçamento médio entre 20 e 60cm. A estas seguem-se, com 30% descontinuidades próximas (F4), com 19% descontinuidades afastadas (F2) e ainda com alguma expressão, com 9% e 3% descontinuidades muito próximas (F5) e muito afastadas (F1), respectivamente. Na análise das três famílias principais, verifica-se, que a primeira família apresenta, com maior representatividade descontinuidades medianamente afastadas (F3), seguidas das descontinuidades próximas (F4). Enquanto, a segunda família apresenta descontinuidades medianamente afastadas (F3), seguidas de descontinuidades afastadas (F2).

No Quadro 47 é apresentado o espaçamento médio das descontinuidades da análise geral.

Quadro 47 – Espaçamento médio das descontinuidades da análise geral.

Famílias	Espaçamento médio	Espaçamento médio corrigido	"Fracture Intercept"	Bloco unitário
	(cm)	(cm)	(cm)	$S1=d1.\text{sen}(a1)$
N[139º/149º[E	89	86	214	
N[74º/84º[E	95	89	241	
Famílias Principais	92	88	113	
Restantes Famílias	76	63	41	
Geral	80	69	30	

➤ CARACTERIZAÇÃO DO GRAU DE COMPARTIMENTAÇÃO DO MACIÇO

É imprescindível fazer uma correcção do espaçamento médio das descontinuidades, a amplitude da correcção é tanto maior quanto maior for a inclinação da descontinuidade. Os valores do espaçamento médio corrigido dão a ideia da ordem de grandeza em que o maciço rochoso estará compartimentado, nunca esquecer, que estes espaçamentos são valores médios. Visto que foram apenas consideradas duas famílias principais, houve a necessidade de introduzir uma outra para ser possível definir o bloco unitário. Contudo, esta não será considerada família, devido à sua baixa representatividade. As descontinuidades consideradas são sub-horizontais e tem direcção N100º/110ºE.

Para definir o bloco unitário é utilizado o índice volumétrico, J_v .

Espaçamento médio (cm)

1ª Família – 86

$$J_v = \frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} + \frac{1}{e_3}$$

2ª Família – 89

$$J_v = \frac{1}{0,86} + \frac{1}{0,89} + \frac{1}{0,18}$$

3ª – 18

$$J_v = 7,8 \text{ descontinuidades/m}^3$$

Após o cálculo do J_v pode-se concluir que o sistema de compartimentação do maciço estudado, segundo os critérios ISRM (1981) (Quadro 35), é classificado por blocos de tamanho médio.

➤ *ABERTURA*

Segundo a classificação da ISRM (1978, 1981), cerca de 57% e 42% das descontinuidades são classificadas como abertas e fechadas, respectivamente. E com apenas 1% das descontinuidades são classificadas com muito abertas. É de referir que cada uma das classes de abertura está dividida em três subclasses, o que torna possível uma análise mais precisa. No maciço em geral, verifica-se, que as descontinuidades classificadas como “fechadas” encontram-se na sua maioria na subclasse “muito apertadas”, as descontinuidades classificadas como “abertas” encontram-se com maior representatividade na subclasse “Aberta”, ainda, as descontinuidades classificadas como “muito abertas” encontram-se na subclasse “muito larga”. Numa análise mais pormenorizada, pode-se constatar, que a primeira e segunda família as descontinuidades são na sua maioria classificadas como Abertas, sendo que o valor da abertura média é de 1mm e 1,7mm, respectivamente.

➤ *PREENCHIMENTO*

Numa análise geral do maciço, pode-se constatar que 39% das descontinuidades estão preenchidas por material esmagado, por outro lado, com 31%, descontinuidades sem qualquer tipo de preenchimento. Ainda, com alguma expressão, com 19% e 11% descontinuidades preenchidas com argila “mole” e argila “dura”, respectivamente. Na análise das famílias, verifica-se que o preenchimento da primeira e segunda família é maioritariamente material esmagado.

➤ *RUGOSIDADE*

Numa abordagem geral, a rugosidade com mais expressão são do tipo plana com 67% das descontinuidades, logo de seguida, com 30% descontinuidades com rugosidade do tipo ondulada, e com 2% descontinuidades com rugosidade do tipo denteada. É de salientar que as três classes definidas para a rugosidade podem-se subdividir em três subclasses cada. Em ambas as classes destaca-se a subclasse lisa a algo rugosa (R1-2). Numa análise pormenorizada, a primeira e segunda família possuem uma rugosidade do tipo plana, sendo que a subclasse se mantém entre ambas em lisa a algo rugosa (R1-2).

➤ *CONTINUIDADE*

É de salientar que a bancada onde se realizou este estudo tinha uma altura máxima de 10m. Pode-se constatar, que as descontinuidades medidas, estão divididas com percentagens muito semelhantes, mesmo assim, com maior representatividade aparecem as descontinuidades pouco contínuas (1-3m), com 34%, de seguida, com cerca de 33%, as descontinuidades medianamente

contínuas (3-10m) e com 32% descontinuidades muito pouco contínuas (<1m). O valor médio da extensão da descontinuidade é de 4,4m na generalidade do maciço. Como seria de esperar não existem descontinuidades medidas com mais de 10m de extensão. Numa análise pormenorizada, as descontinuidades da primeira família apresentam-se medianamente contínuas, seguidas de pouco contínuas. A segunda família apresenta-se dividida com igual percentagem entre descontinuidades muito pouco contínuas e medianamente contínuas, seguida de descontinuidades pouco contínuas.

➤ *TERMINAÇÃO*

Numa análise geral do maciço, verifica-se que 63% da terminação das descontinuidades é noutra descontinuidade, 32% com terminação no obscuro, sendo que os restantes 5% terminam na rocha. Na análise por famílias, verifica-se que a primeira e segunda família as descontinuidades terminam noutra descontinuidade, seguidas com terminação no obscuro.

➤ *CURVATURA*

Em termos globais, a curvatura das descontinuidades é fundamentalmente do tipo planas a ligeiramente curvas (C1-2), com cerca de 80%, seguidas de 18% de descontinuidades curvas (C3) e ainda, com 2% das descontinuidades são muito curvas (C4-5). Na análise das famílias verifica-se que tanto na primeira como na segunda família as descontinuidades são do tipo planas a ligeiramente curvas (1-2), seguidas de descontinuidades do tipo curvas (C3).

➤ *PRESENÇA DE ÁGUA*

As descontinuidades apresentam-se maioritariamente húmidas com cerca de 76%, com 24% das descontinuidades apresentam-se secas, e, com apenas 1% as descontinuidades que se apresentam gotejantes. Na análise das famílias verifica-se que a primeira e segunda família apresenta com maior representatividade descontinuidades húmidas, seguida de descontinuidades secas.

No Quadro 48 é apresentado o quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos da análise geral.

Quadro 48- Quadro síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos da análise geral.

Parâmetro	1ª Família	2ª Bancada	Família Principais	Restantes Famílias	Geral
Grau de alteração	W1-2	W1-2	W1-2	W1-2	W1-2
Tipo de descontinuidades	Diaclase	Diaclase	Diaclase	Diaclase	Diaclase
Grau de fracturação	F3	F3	F3	F3	F3
Abertura	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta
Tipo de preenchimento	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado	Mat. Esmagado
Rugosidade	Plana	Plana	Plana	Plana	Plana
	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2
Continuidade	Medianamente contínua	Medianamente contínua	Medianamente contínua	Muito pouco contínua	Pouco contínua
Terminação	Descontinuidade	Descontinuidade	Descontinuidade	Descontinuidade de	Descontinuidade
Curvatura	C1-2	C1-2	C1-2	C1-2	C1-2
Presença de água	Húmido	Húmido	Húmido	Húmido	Húmido

3.4.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Para ser possível a caracterização de um maciço rochoso é importante o conhecimento da resistência à compressão do material-rocha, é possível avaliar este recorrendo à determinação da dureza com esclerómetro portátil (ou martelo de Schmidt do tipo L), podendo conduzir à estimativa do valor da resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1985, 2007).

Foram realizadas 29 estações geomecânicas para a realização dos ensaios de resistência de campo com esclerómetro portátil. Através das curvas de calibração (ábaco de Miller), adequadas ao modelo utilizado e considerando uma densidade média da rocha de $26,65 \text{ kN/m}^3$, constatou-se que o maciço classifica-se (Figura 74), na sua maioria, como sendo do tipo S2 (resistência elevada), segundo a ISRM (1981), sendo que o valor médio da resistência é de 80,43 MPa.

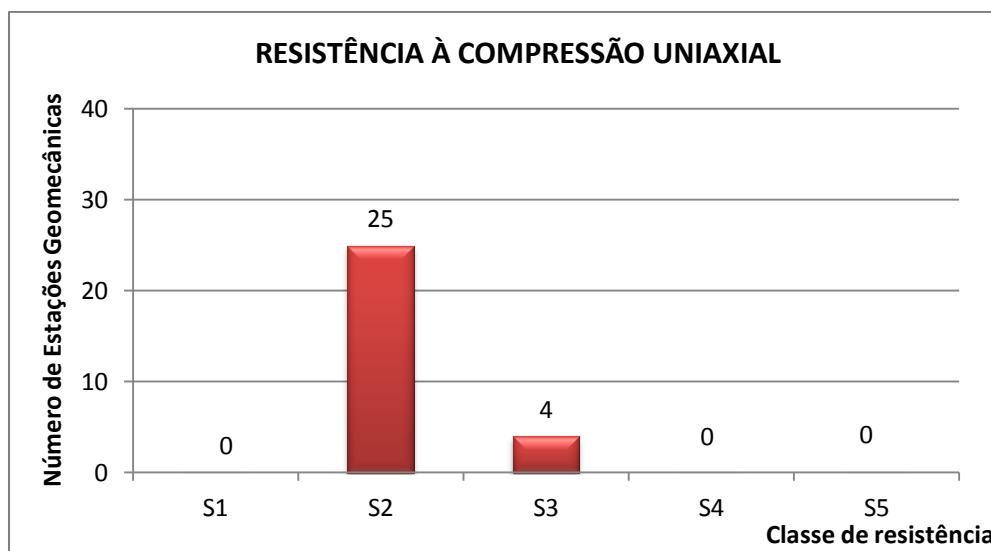


Figura 74 – Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso de V.N. de Famalicão

3.4.5. ENSAIO DE DESGASTE “LOS ANGELES” E MICRO DEVAL

Através do ensaio “Los Angeles” é possível obter o índice de desgaste. Este é um valor que está relacionado com a resistência à abrasão por meios mecânicos e com a capacidade resistente dos agregados. O ensaio “Micro Deval” consiste na medição do desgaste produzido pela fricção entre os agregados e uma carga abrasiva. Recorreu-se à base de dados de ensaios da empresa SecilBritas, S.A., para recolher valores de ensaios datados entre Janeiro e Abril de 2013 (Quadro 49).

Quadro 49 – Resultados dos ensaios de desgaste “Los Angeles” e Micro Deval.

Agregado Ensaiado (d/D)	Data do Ensaio	LA (NP EN 1097 – 2)	MD (EN 1097 – 1)
(mm)		(%)	(%)
31,5/50	30-01-2013	16%	10%
10/14	22-03-2013	27%	9%
10/14	02-05-2013	29%	9%

Utiliza-se como valor de referência a média dos resultados obtidos. Sendo que, o mais correcto seria recolher uma amostra representativa e realizar o ensaio com o agregado proveniente da bancada em estudo. Contudo, isso não foi possível pois existe um plano de frequência de ensaios a cumprir, fazendo com que não tivesse coincidido o ensaio planeado com a bancada estudada. Como tal, com a impossibilidade da realização do ensaio para a bancada desmontada, optou-se por atribuir ao maciço um valor médio que permitisse ter uma ordem de grandeza deste parâmetro.

3.4.6. ÍNDICE DE CARGA PONTUAL

O ensaio de carga pontual (Point Load Test, PLT) realizado no Laboratório de Mecânica das Rochas do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP, para a realização deste ensaio, foram recolhidos duas amostras do material rocha, uma referente ao maciço medianamente alterado, W3, e outra do maciço são, W1. Apenas foi possível ensaiar 12 provetes para a amostra do material W1, e 4 provetes para a amostra do material W3. Sendo que neste último caso, não foi possível obter mais provetes, devido à dificuldade no corte das amostras. Contudo, segundo a proposta da ISRM (1972), o ensaio só é válido quando são ensaiados pelo menos 10 provetes por amostra, assim o resultado do ensaio de carga pontual para o material W3, apenas servirá para registo.

Dos 12 provetes ensaiados para o maciço são, W1 (Figura 75), foram eliminados, de acordo com a proposta da ISRM (1985, 2007) os valores mais altos e mais baixos do índice de resistência à carga pontual [$Is(50)$], para se calcular a média de $Is(50)$, cujo valor é 11,79 MPa. Este valor permitiu determinar a resistência à compressão uniaxial, a qual se situa no valor de 260 MPa.

Relativamente aos 4 provetes ensaiados para o maciço medianamente alterado, W3 (Figura 76), o valor médio do índice de resistência à carga pontual é de 10,90 MPa, sendo que a resistência à compressão uniaxial é cerca de 240 MPa. Contudo, este valor é apenas representativo. Nos Quadros 50 e 51 é apresentado os resultados dos ensaios PLT para as duas amostras recolhidas.

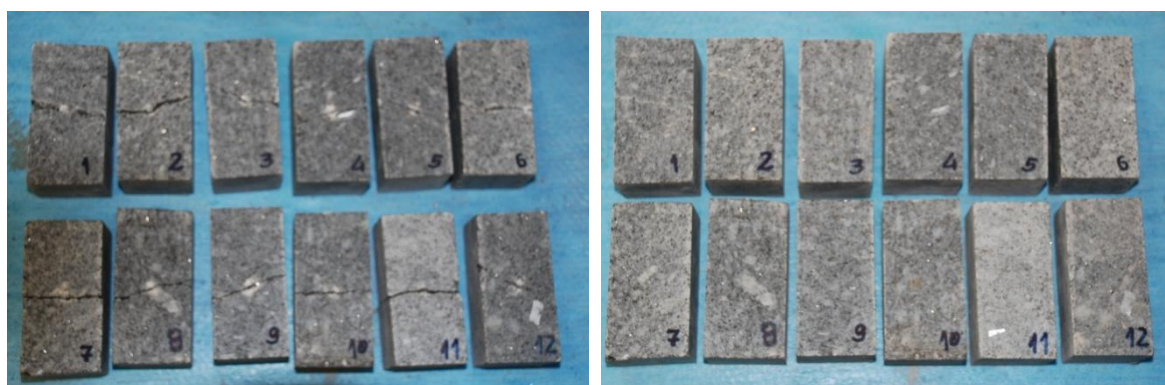


Figura 75 – Amostras (W1) ensaiadas no PLT (3º Painel).



Figura 76 – Amostras (W3) ensaiadas no PLT (3º Painel).

Quadro 50 – Resultados dos ensaios de carga pontual, do maciço são, W1.

Ensaio	De (mm)	L (mm)	W (mm)	F (mm)	P (KN)	Is (Mpa)	Is(50) (Mpa)	Obs.
1	49,00	98,00	49,00	0,991	18,50	7,71	-	Mais baixo
2	49,00	96,00	50,00	0,991	23,00	9,58	9,49	Válido
3	49,00	97,00	49,00	0,991	27,00	11,25	11,14	Válido
4	50,00	100,00	50,00	1,000	36,00	14,40	-	Mais Alto
5	49,00	99,00	49,00	0,991	28,50	11,87	11,76	Válido
6	48,00	96,00	50,00	0,982	33,50	14,54	14,28	Válido
7	49,00	98,00	50,00	0,991	26,00	10,83	10,73	Válido
8	47,00	102,00	50,00	0,973	24,00	10,86	10,57	Válido
9	49,00	100,00	52,00	0,991	30,50	12,70	12,59	Válido
10	49,00	102,00	51,00	0,991	32,50	13,54	13,41	Válido
11	48,00	100,00	48,00	0,982	27,00	11,72	11,51	Válido
12	49,00	100,00	49,00	0,991	30,00	12,49	12,38	Válido
Valor médio da resistência							11,79	
Resultado							Desvio padrão	0,98
							Amplitude	4,78

Quadro 51 – Resultados dos ensaios de carga pontual, do maciço medianamente alterado, W3.

Ensaio	De (mm)	L (mm)	W (mm)	F (mm)	P (KN)	Is (Mpa)	Is(50) (Mpa)	Obs.
1	49,00	101,00	49,00	0,991	18,50	7,71	-	Inválido
2	49,00	100,00	50,00	0,991	23,00	9,58	9,49	Válido
3	49,00	98,00	49,00	0,991	27,00	11,25	11,14	Válido
4	48,00	99,00	50,00	0,982	36,00	15,63	-	Inválido
Resultado							Valor médio da resistência	10,90

É de salientar que os resultados do ensaio PLT deverão ser encarados numa forma informativa, visto que foram apenas seleccionados dois pontos do maciço em estudo. Contudo, são resultados úteis para aferir os valores obtidos no ensaio esclerométrico, tendo sido, este último, o ensaio eleito para a caracterização da resistência do maciço rochoso, pois através deste ensaio conseguiu-se abranger a maior área de estudo.

3.4.7. DRILLING RATE INDEX (DRI)

O Drilling Rate Index (DRI) caracteriza a perfurabilidade do maciço, e tenta replicar o fenómeno da perfuração. O DRI é a combinação do valor de Brittleness S20 e o valor SJ de Sievers.

O ensaio de Perfurabilidade foi realizado no Laboratório de Mecânica das Rochas do Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico, em Lisboa, foram recolhidas amostras do material rocha, as quais permitiram obter 5 amostras. Contudo, apenas foi possível a realização de 3 ensaios, devido ao estado que se encontrava a ferramenta de perfuração e à inexistência de ferramentas novas. No Quadro 52 estão apresentados os dados obtidos do ensaio de Perfurabilidade.

Quadro 52 – Dados do ensaio de Perfurabilidade.

Ponto	Medição	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
1	1	0,14	1,82	0,25
	2	0,13	1,99	0,92
	3	0,2	1,65	1,25
	4	0,2	1,47	1,05
2	1	1,1	0,78	0,18
	2	1,12	0,8	0,88
	3	1,21	0,5	1,13
	4	1,22	0,54	0,45
3	1	0,89	0,95	0,15
	2	0,97	0,9	0,82
	3	1,06	0,65	1,25
	4	0,98	0,4	0,4
4	1	0,9	0,72	0,25
	2	0,85	0,95	1,01
	3	0,76	0,64	1,33
	4	0,7	0,41	0,54
5	1	0,56	0,65	0,22
	2	0,64	0,45	1,05
	3	0,72	0,26	1,41
	4	0,52	0,45	0,47

O valor SJ expresso em décimas de milímetros, é a média dos ensaios realizados com amostras pré-cortadas. Assim, o valor SJ de Sievers é 0,781mm. A Figura 77 apresenta as amostras ensaiadas no equipamento de perfurabilidade.

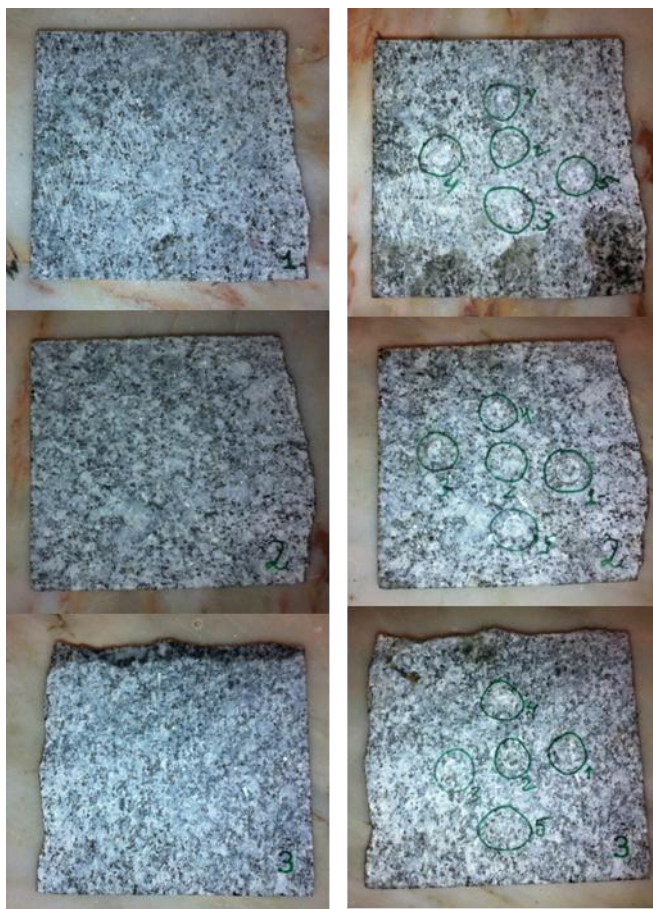


Figura 77 – Amostras do maciço, ensaiadas no equipamento de perfurabilidade.

Relativamente ao ensaio de friabilidade (Brittleness Test) efectuado no Laboratório de Mecânica das Rochas do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP, foram recolhidos amostras do material rocha, posteriormente, este material foi britado. Através deste material, foram realizados 5 ensaios (Quadro 53). O valor S20 corresponde ao valor médio dos ensaios realizados, sendo que é a percentagem em peso do material abaixo de 11,2mm. Posto isto, o valor S20 é de 44,2%.

Quadro 53 - Dados do ensaio de friabilidade – Brittleness Test

Ensaio nº		Massa provete fracção 11,2 - 16 (mm) antes do impacto	Massa provete >11, 2mm após impacto	Massa provete <11,2 mm após impacto
1	G	504,0	298,0	206,0
	%	100,00	59,1	40,9
2	G	504,00	286,0	218,0
	%	100,00	56,7	43,3
3	G	504,00	246,0	258,0
	%	100,00	48,8	51,2
4	G	504,00	286,0	218,0
	%	100,00	56,7	43,3
5	G	504,00	290,0	214,0
	%	100,00	57,5	42,5

Sabendo o valor SJ de Sievers e o valor S₂₀, é possível através da Figura 78 obter o valor do DRI.

Assim, sabendo que o valor SJ é 0,781mm e o valor S₂₀ é 44,2%, o valor DRI é 30.

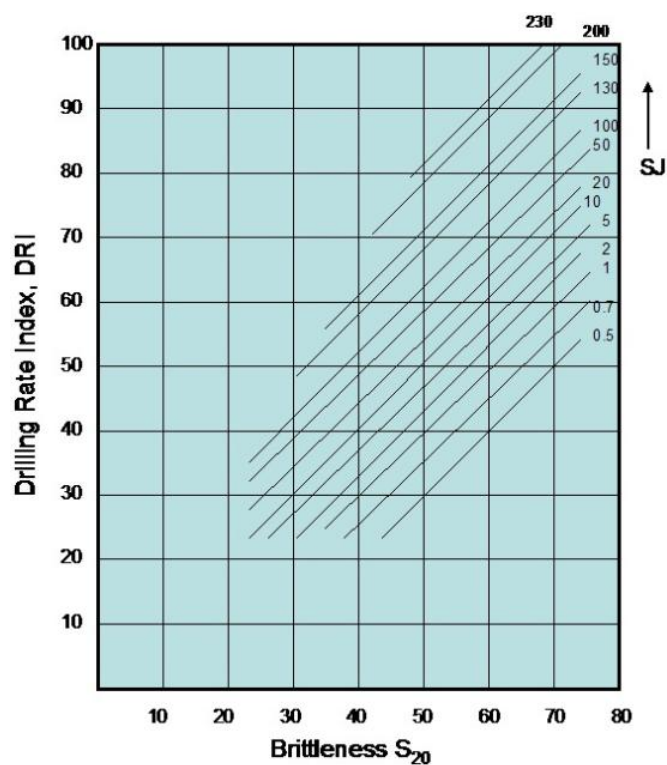


Figura 78 – Ábaco de avaliação do DRI.

3.5. ANÁLISE DE RESULTADOS

O principal factor que influencia a fragmentação e o resultado global do desmonte é que o furo siga o caminho traçado em toda sua extensão. A verticalidade dos furos é importante, devendo serem evitados os desvios de perfuração. Para que o resultado prático corresponda aos resultados pré-dimensionados de desmonte, o primeiro passo é que os furos sejam realmente executados como se encontra no modelo teórico. Isto significa que os furos devem atingir o ponto definido na cota final, na direcção correcta e com a profundidade adequada (Figura 79). Existem vários factores que influenciam o desvio do furo, sendo, na presente dissertação analisados apenas os parâmetros geotécnicos relacionados com estes desvios.

Após efectuado o estudo dos parâmetros geológico-geotécnicos, será realizado uma análise pormenorizada de todas as descontinuidades que intersectam os furos. Identificadas essas mesmas descontinuidades será estudado a relação entre o tipo de gradiente do desvio da perfuração e o ângulo de intercepção das descontinuidades, assim como de outras propriedades das mesmas que possam influenciar o resultado dos desvios, como por exemplo; abertura, preenchimento rugosidade, entre outras.

O método adoptado neste estudo consiste nas seguintes fases:

- Análise fotográfica do maciço;
- Identificação das meias canas deixadas na pega anterior;
- Atribuição dos furos previamente efectuados às meias canas observadas;
- Marcação de todas as descontinuidades medidas;
- Medição do gradiente do desvio;
- Medição dos ângulos de intercepção;
- Análise das propriedades das descontinuidades que influenciam o desvio.

Na análise fotográfica não foi possível a correcta identificação de todas as meias canas deixadas pelos furos previamente executados. Conhecendo o valor do espaçamento entre furos e os resultados do ensaio Boretrak, foi possível executar, na perfeição, o posicionamento dos furos. Posteriormente, com a localização do ponto inicial da Scanline e do primeiro furo realizado, medidos com o GPS de alta precisão, foi possível a marcação correcta de todas as descontinuidades. Com a representação esquemática do painel, procedeu-se à identificação das descontinuidades que intersectavam os furos. A partir deste foi possível medir o gradiente do desvio, bem como a medição dos ângulos de intersecção. Foi ainda estudada a influência que os parâmetros: abertura, rugosidade e preenchimento de uma descontinuidade provocam no desvio

de perfuração. Esta análise será apenas realizada no segundo e terceiro Painel, devido às razões apresentadas anteriormente.

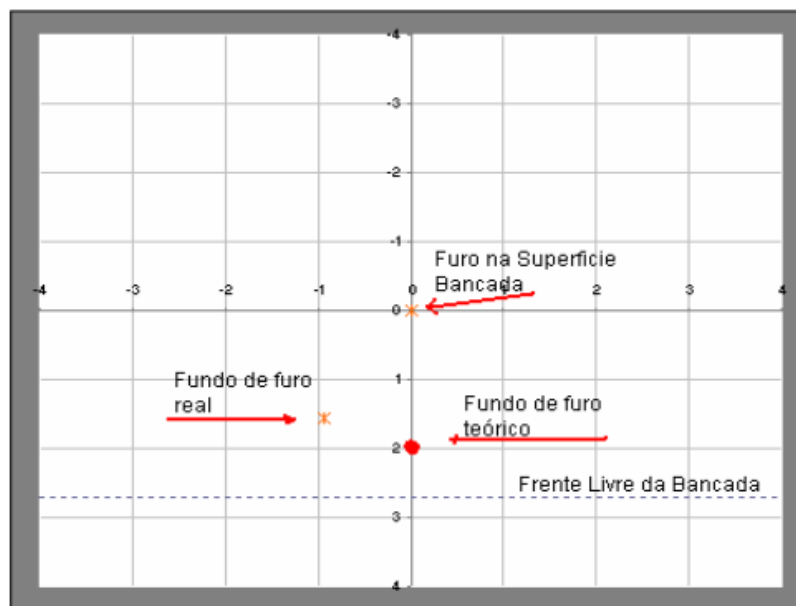


Figura 79 - Projecção em planta do desvio no Furo 1, da 1ª Pega, da pedreira da Secil em Famalicão, registado pelo Boretrak no dia 18/03/2013.

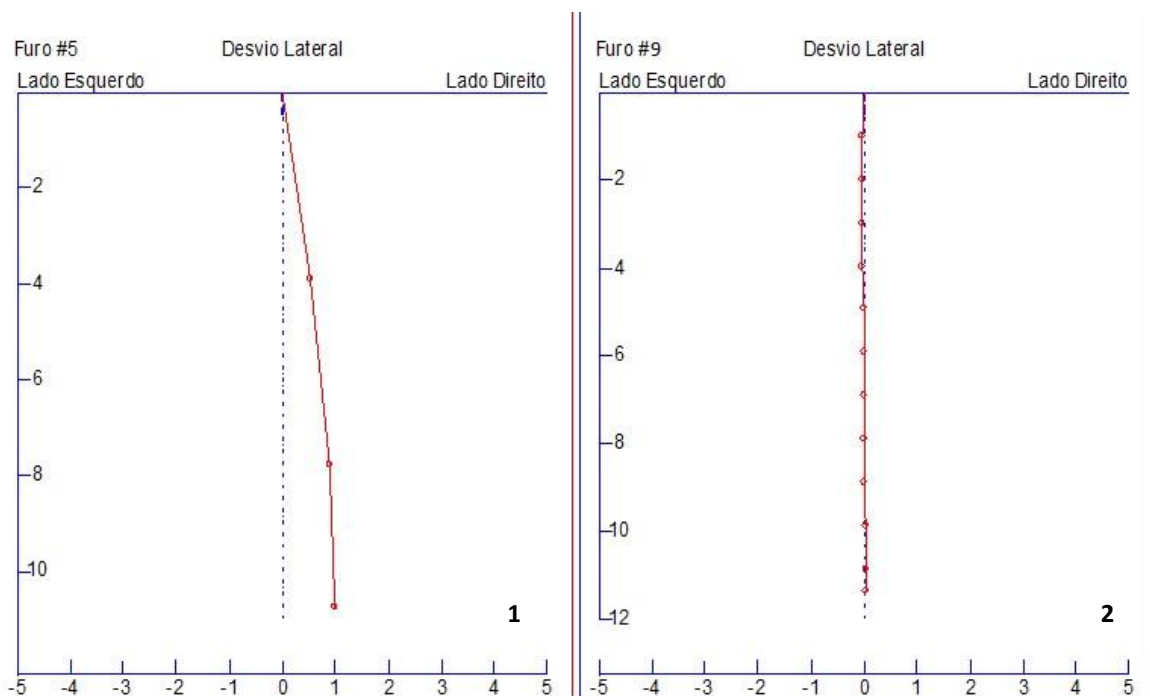


Figura 80 – Exemplos de desvio lateral (1-Furo nº5 da 1ª Pega; 2- Furo nº9 da 2ª Pega).

Na Figura 80 é apresentado um exemplo de projecção do desvio na direcção (X), desvio lateral, numa análise em toda a extensão do furo, com a determinação do valor dos desvios no eixo do X (+ ou -), se desvia para a direita (+) ou para a esquerda (-) segundo uma vertical teórica do furo. Este tipo de desvio é motivado pela flexão dos acessórios de perfuração em conjugação com a matriz rochosa.

No exemplo da imagem da Figura 80 nº1, verifica-se o desvio de direcção lateral por flexão para a esquerda (+), que ocorre em toda a trajectória do furo com maior significado mais próximo do fundo do furo, sendo aos cerca de 11 m, de aproximadamente 1,0 m. No exemplo da imagem da Figura 80 nº2, observa-se que o desvio de direcção lateral por flexão é bastante atenuado, consequência da aplicação da correcção estuda na pega anterior.

A possibilidade de medição dos desvios ocorridos na perfuração está também associada, quando possível, a um conhecimento exacto da dimensão em profundidade da frente de bancada até cada um dos furos, conhecida por acção de leitura realizada através do varrimento laser nessa frente.

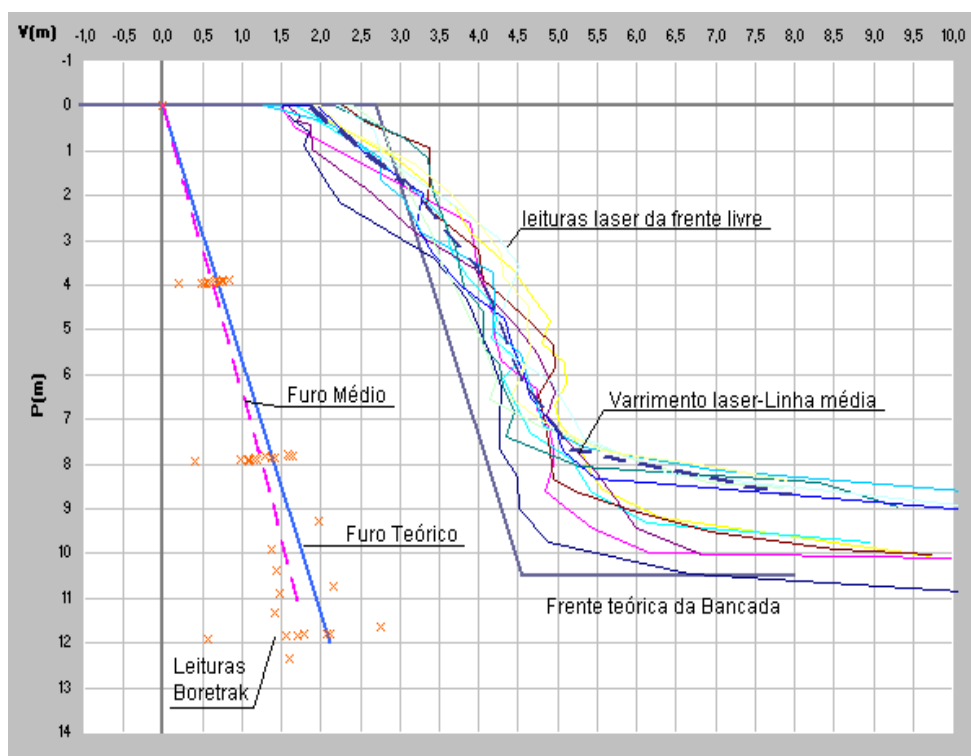


Figura 81 - Leituras Boretrak, associadas às leituras laser do 2º Painel.

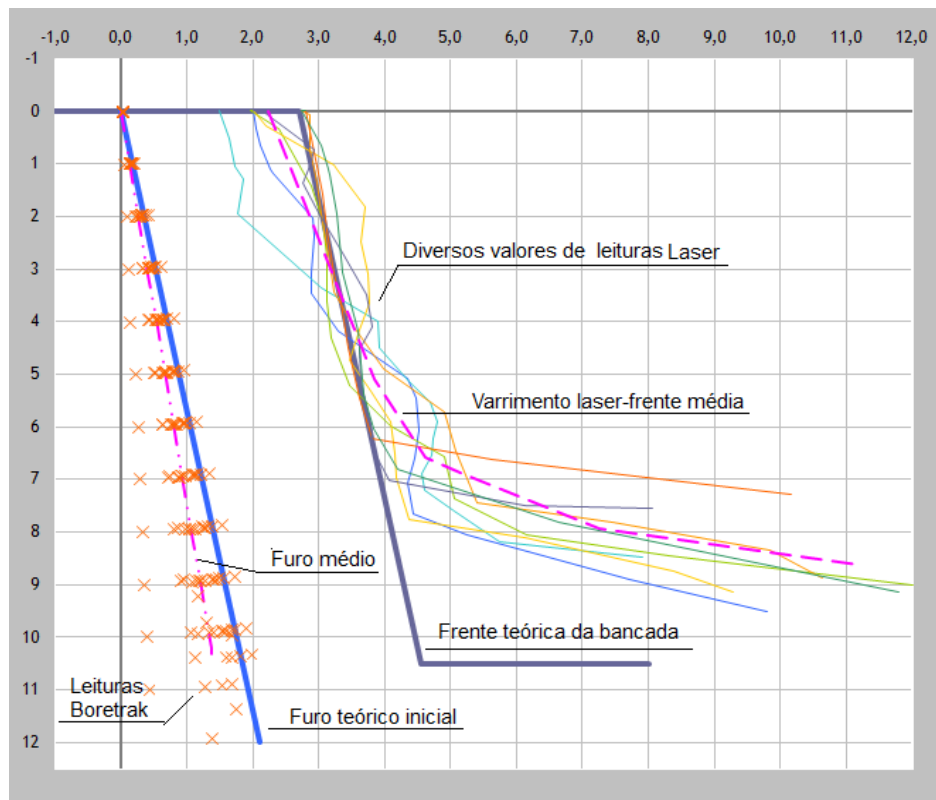


Figura 82 - Leituras Boretrak, associadas às leituras laser do 3º Painel.

Na Figura 81 e 82 estão representados os dados levantados pelo Boretrak e os decorrentes do varrimento laser, onde se verifica, no conjunto, um certo ajustamento do furo médio face à frente livre.

3.6. RESULTADOS

Os três painéis estudados serão apresentados através de uma representação esquemática dos furos e de todas as descontinuidades medidas. No primeiro painel apenas serão representadas as descontinuidades medidas (Anexo VI), devido à falta dos dados da pega executada anteriormente. No segundo e terceiro painéis serão representados os furos executados, bem como todas as descontinuidades medidas (Anexo VI). Este estudo foi realizado nos furos classificados com desvio pontual no eixo dos XX. Para a medição do gradiente do desvio foi tido em conta a subtração do ponto posterior ao anterior da intersecção da descontinuidade com o furo, sendo posteriormente medidos os ângulos de intersecção entre o furo e a descontinuidade. Em seguida são apresentados os resultados referentes ao ângulo de intersecção, bem como, a influência dos parâmetros geotécnicos no desvio do furo.

➤ **ÂNGULO DE INTERSECÇÃO**

Ao analisar a Figura 83 e 84 pode-se verificar que no 2º Painel existe um maior gradiente dos desvios em relação ao 3º Painel. Isto deve-se, ao estudo dos desvios que se realizou no 2º Painel, neste tentou-se implementar uma possível correcção para minimizar esses mesmos desvios e verificou-se efectivamente uma redução destes.

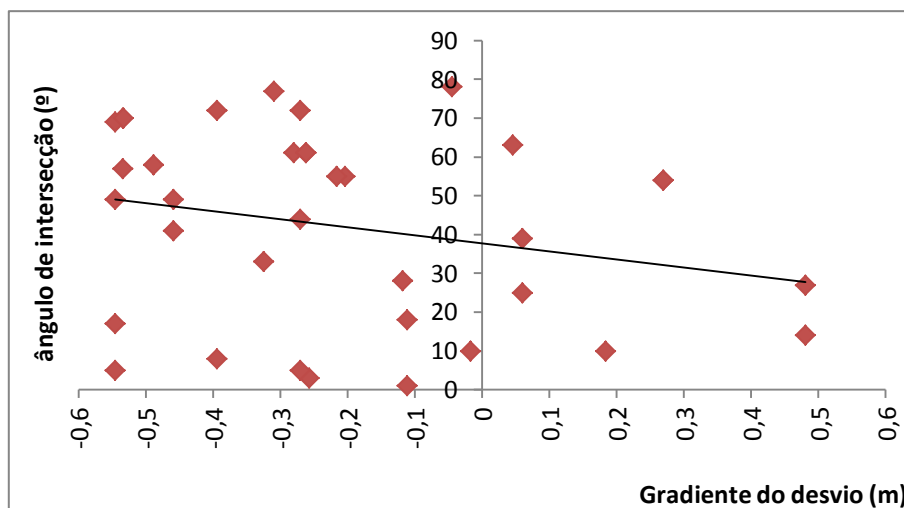


Figura 83 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 2º Painel.

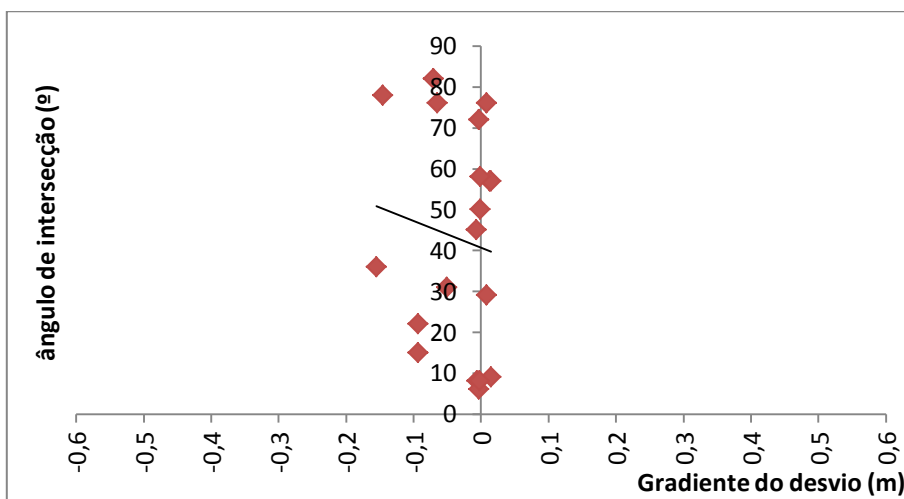


Figura 84 - Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 3º Painel.

Após a análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção, verificou-se a necessidade de dividir a análise em dois casos (Figura 85):

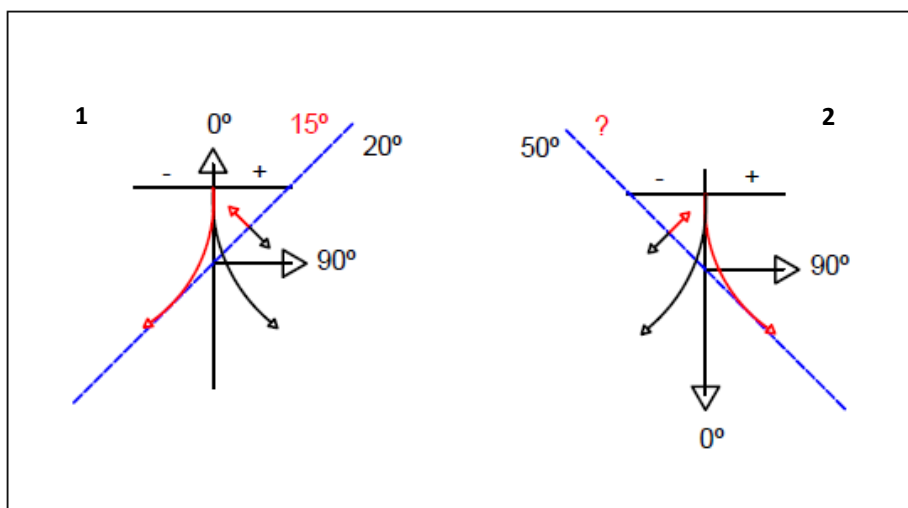


Figura 85 – Representação da variação do desvio do furo com a inclinação da descontinuidade.

Para o primeiro caso, estão abrangidas todas as descontinuidades que inclinam para o quadrante W, e portanto, afectam o 1º quadrante do referencial. No segundo caso, as descontinuidades abrangidas são todas aquelas que inclinam para o quadrante E, logo afectam o 2º quadrante do referencial.

Na Figura 86 e 87 estão apresentadas as variações do desvio de acordo com o ângulo de intersecção para descontinuidades abrangidas no 1º quadrante e no 2º quadrante.

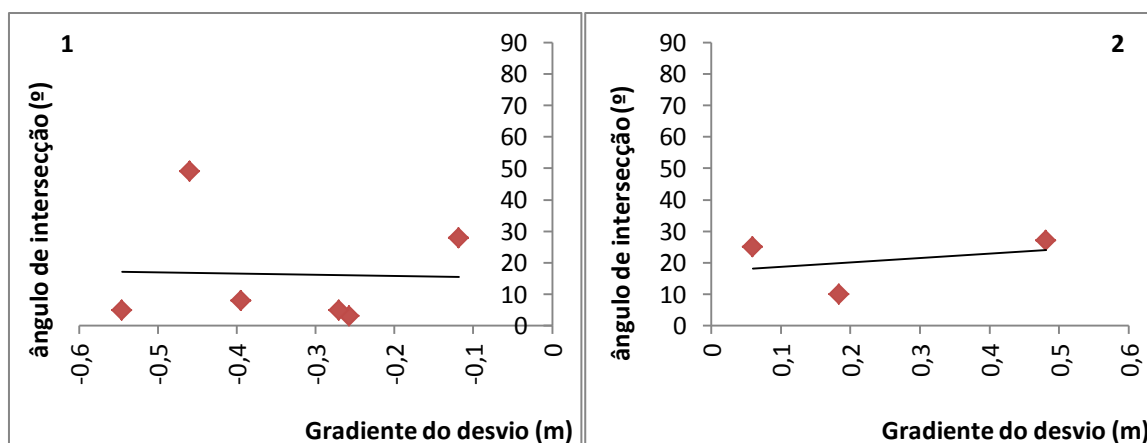


Figura 86 - Variação do desvio do furo com a inclinação da descontinuidade, referentes às descontinuidades do 1º quadrante (1-Gradiente do desvio negativo; 2-Gradiente do desvio positivo).

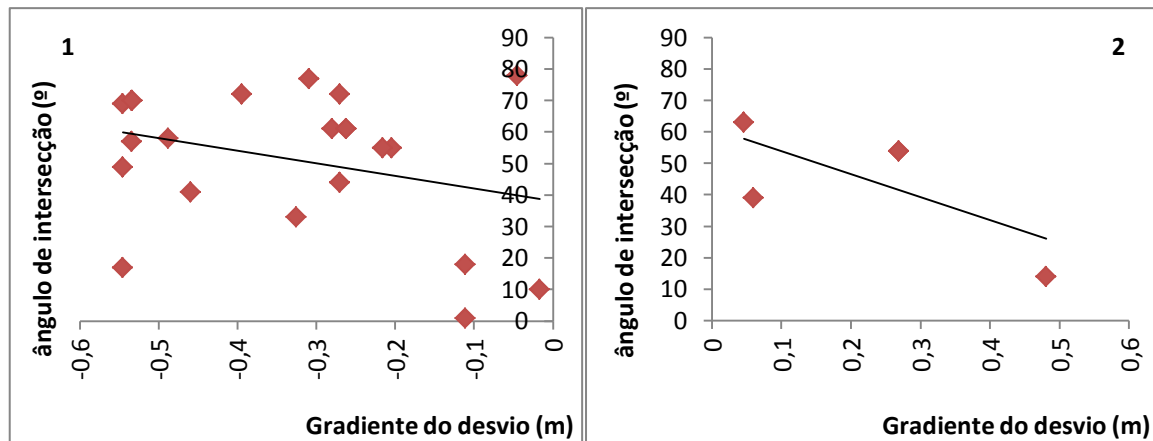


Figura 87 - Variação do desvio do furo com a inclinação da descontinuidade, referentes às descontinuidades do 2º quadrante (1-Gradiente do desvio negativo; 2-Gradiente do desvio positivo).

Após análise da Figura 85, para o primeiro caso, pode-se concluir que os ângulos de intersecção entre o furo e a descontinuidade que o intersecta, quando inferiores a 15º o furo acompanha a descontinuidade, logo desviam para a esquerda. Pelo contrário, ângulos de intersecção superiores a 20º o furo atravessa a descontinuidade, desviando assim para a direita. Para o segundo caso, verifica-se que descontinuidades com ângulos de intersecção superiores a 50º o furo atravessa a descontinuidade, logo desviam para a esquerda. Em furos que desviam para a direita, ou que acompanham o furo não foi possível perceber qual seria o ângulo de intersecção para o qual se verifica essa situação.

➤ ABERTURA

Na Figura 88 e 89 estão apresentadas o gradiente do desvio e o ângulo de intersecção para descontinuidades Fechadas e descontinuidade Abertas para o 2º e 3º Painéis.

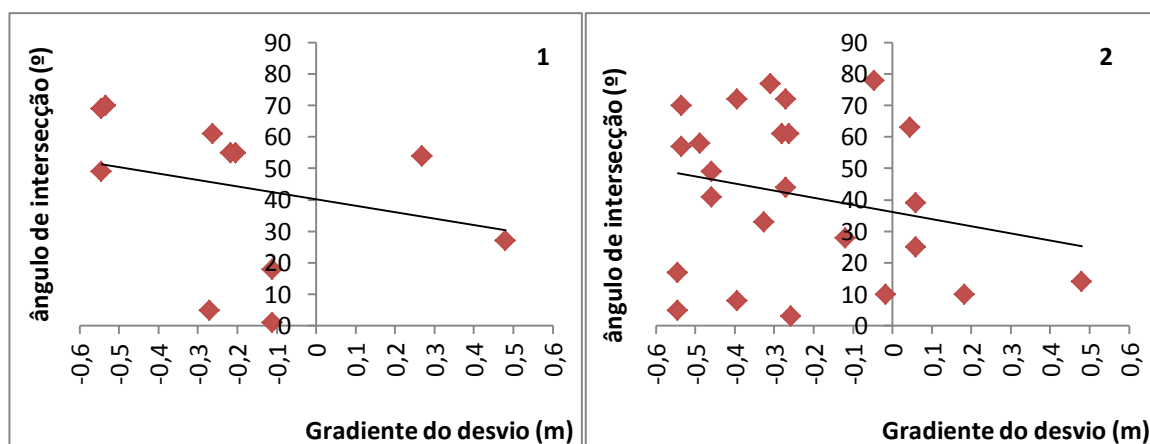


Figura 88 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 2º Painel (1- Descontinuidade Fechada; 2- Descontinuidade Aberta).

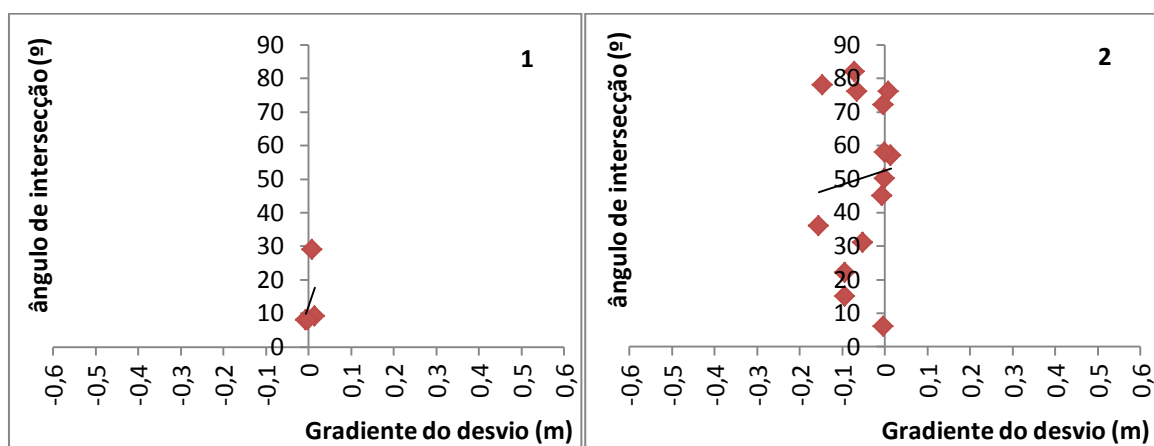


Figura 89 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 3º Painel (1- Descontinuidade Fechada; 2- Descontinuidade Aberta).

Quadro 54 – Valor do gradiente do desvio e percentagem de descontinuidades do 2º e 3º Painel.

	2º Painel		3º Painel	
Abertura	Gradiente do desvio (m)	Percentagem de descontinuidades	Gradiente do desvio (m)	Percentagem de descontinuidades
Aberta	0,31	67%	0,05	79%
Fechada	0,27	33%	0,01	21%

A partir do Quadro 54 pode-se analisar que tanto no 2º Painel como no 3º Painel existe um maior gradiente do desvio para descontinuidades Abertas do que para descontinuidades Fechadas. O que significa que existe uma maior tendência para ocorrer maiores gradientes de desvios quanto maior for a Abertura da descontinuidade.

➤ **PREENCHIMENTO**

Na Figura 90 e 91 estão apresentadas o gradiente do desvio e o ângulo de intersecção para discontinuidades sem preenchimento, discontinuidade preenchidas com material esmagado, discontinuidades preenchidas com argila mole e discontinuidades preenchidas com argila dura para o 2º e 3º Painéis.

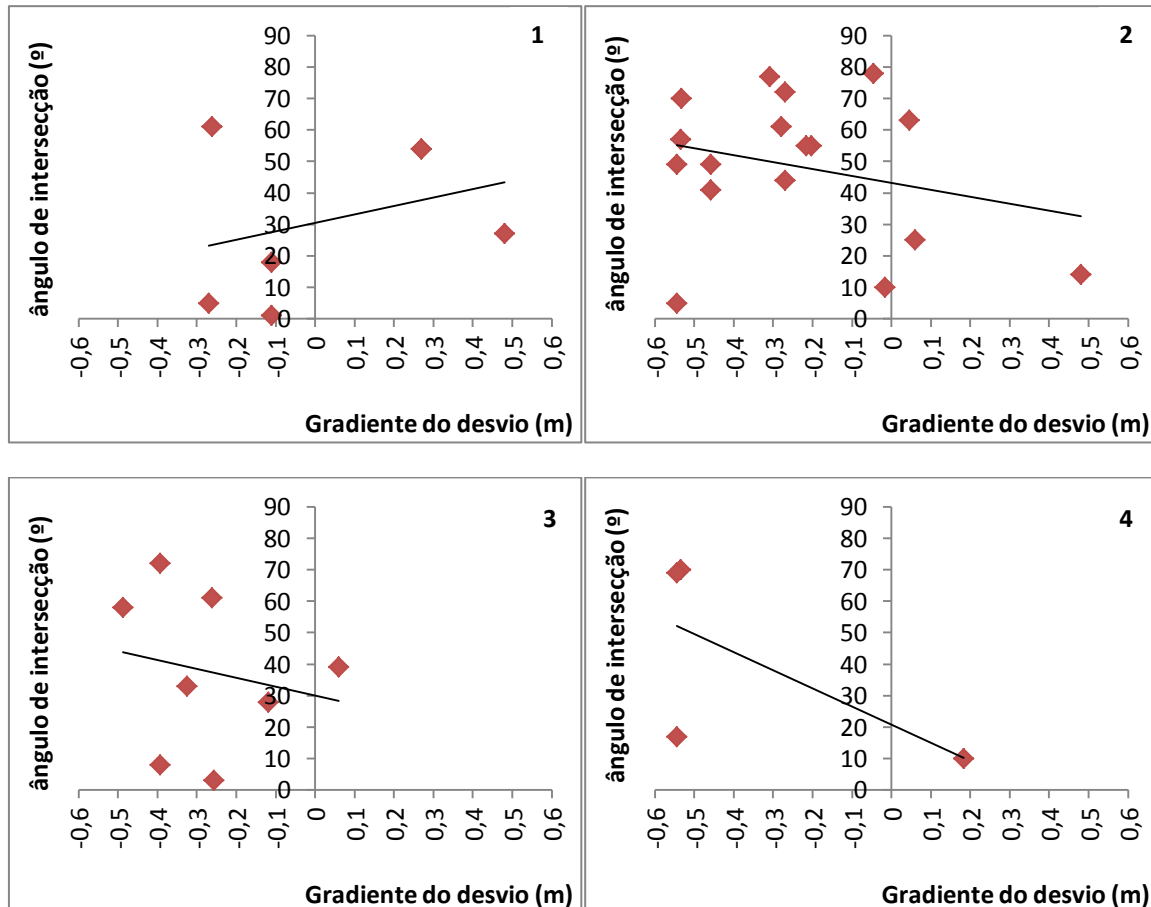


Figura 90 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 2º Painel (1- Descontinuidade sem preenchimento; 2- Descontinuidade preenchida com Material Esmagado; 3- Descontinuidade preenchida por Argila Mole; 4- Descontinuidade preenchida por Argila Dura).

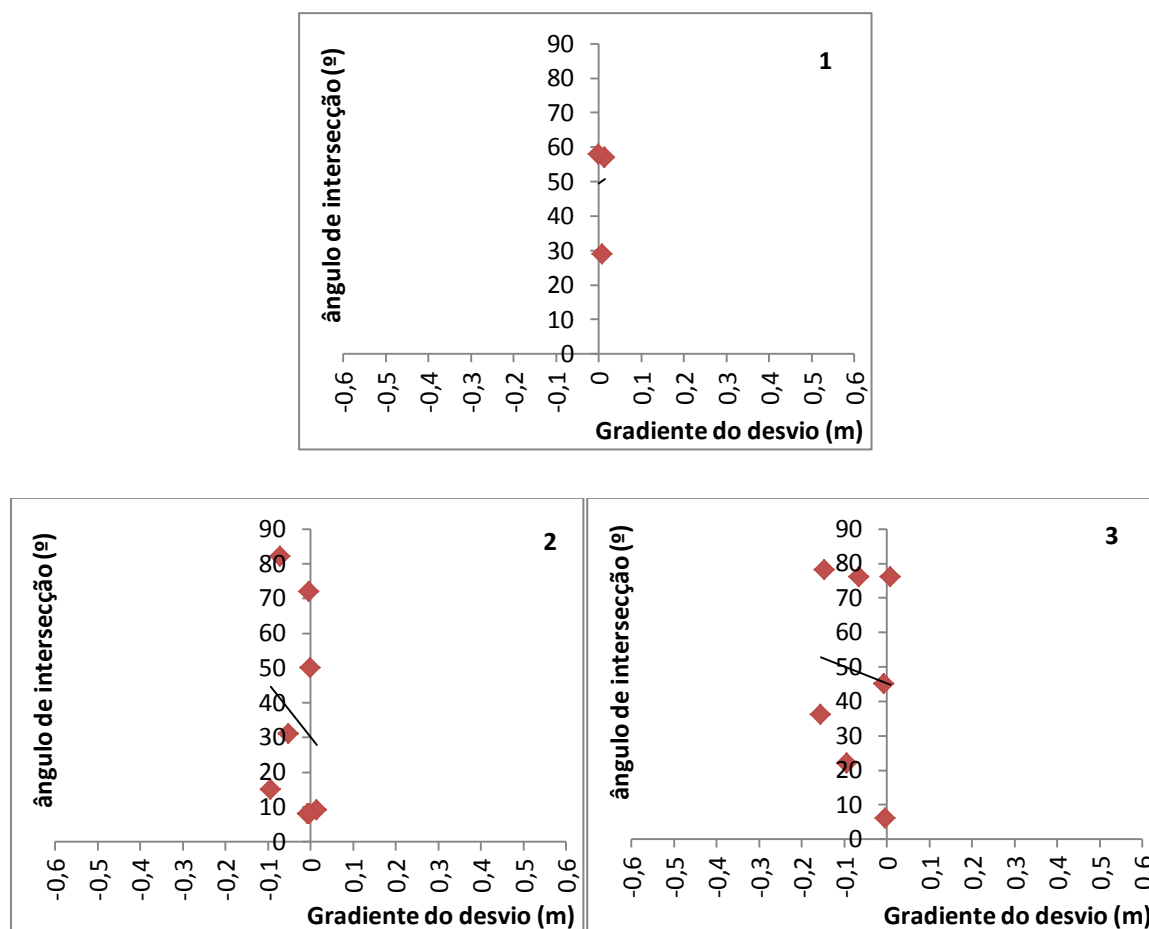


Figura 91 – Análise do gradiente do desvio e o ângulo de intersecção do 3º Painel (1- Descontinuidade preenchida com Material Esmagado; 2- Descontinuidade preenchida por Argila Mole; 3- Descontinuidade preenchida por Argila Dura).

Quadro 55 - Valor do gradiente de desvio e percentagem de descontinuidades do 2º e 3º Painel.

2º Painel			3º Painel	
Preenchimento	Gradiente do desvio (m)	Percentagem de descontinuidades	Gradiente do desvio (m)	Percentagem de descontinuidades
Material Esmagado	0,30	47%	0,01	21%
Nenhum	0,25	20%	-	0%
Argila mole	0,29	22%	0,03	42%
Argila dura	0,42	11%	0,07	37%

Através do Quadro 55 e analisando o preenchimento das descontinuidades, podemos observar que no 2º Painel as descontinuidades sem preenchimento têm menor gradiente do desvio que descontinuidades com preenchimento. Contudo, verificou-se que as descontinuidades sem preenchimento estão classificadas na sua totalidade como descontinuidades fechadas, logo apresentam menores desvios. Pode concluir-se também que descontinuidades preenchidas com

argila dura possuem um gradiente do desvio maior que descontinuidades preenchidas com argila mole e material esmagado.

➤ **RUGOSIDADE**

No Quadro 56 estão apresentadas o gradiente do desvio e a percentagem de descontinuidade para o 2º e 3º Painéis. Pode-se constatar que a maioria das descontinuidades possui uma rugosidade Plana, não havendo assim interesse de analisar a influência que o parâmetro Rugosidade apresenta.

Quadro 56 - Valor do gradiente do desvio e percentagem de descontinuidades do 2º e 3º Painel.

2º Painel			3º Painel	
Rugosidade	Gradiente do desvio (m)	Percentagem de descontinuidades	Gradiente do desvio (m)	Percentagem de descontinuidades
Plana	0,29	89%	0,04	95%
Denteada	0,48	3%	0,00	5%
Ondulada	0,33	8%	-	0%

CAPÍTULO IV



Mina de Chuquibambilla no deserto do Atacama, norte do Chile.

4. CONCLUSÕES

4. CONCLUSÕES

Foi aplicada a técnica de amostragem linear às superfícies expostas do maciço para a recolha dos parâmetros geológico-geotécnicos de cada painel estudado. Foram utilizadas fichas de campo expeditas, criadas e desenvolvidas por Ramos, 2008 e Fonseca, 2008, que permitem um tratamento estatístico de consulta básico dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos de campo, bem como uma leitura fácil, rápida e completa do objecto em estudo.

Como conclusões finais deste trabalho, destacam-se:

- Segundo os serviços Geológicos de Portugal [Folhas 5-D (Braga) – Ferreira et al., 2000 e 9-B (Guimarães) – Andrade & Rocha, 1986], o granito que aflora na área de estudo está referenciado como Granito de Airão, Aves e Roriz. Este corresponde a um monzogranito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico. Este granito possui cor geralmente cinzenta e textura bastante uniforme. A análise dos dados do grau de alteração permitiu classificar o material-rocha como muito pouco alterado a ligeiramente alterado (W1-2), tendo-se verificado em zonas muito pontuais, principalmente em zonas que evidenciam sinais de oxidação, um material-rocha medianamente alterado (W3);
- Na análise por painéis das famílias principais de descontinuidades, constatou-se que as famílias se mantinham nos diferentes painéis. Logo, existe uma continuidade, ou prolongamento, dessas mesmas descontinuidades.
- Na análise geral, as principais famílias de descontinuidades apenas englobam 27% do total das descontinuidades cartografadas. Para o objectivo que nos propusemos na área de desmonte de maciços rochosos fracturados, estes dados revelam a importância do conhecimento aprofundado de todas as descontinuidades no maciço (diaclasses, fracturas, falhas, fissuras...), tal como preconizado pela ISRM (1981) ao introduzir o conceito de grau de fracturação (“Fracture intercept”) ao longo da amostragem linear. Assim, sabe-se que a representação das principais famílias de descontinuidades apresenta uma relevante importância na definição dos sistemas de fracturação (tectónica) regional do maciço.

- O espaçamento médio é um dado referente à caracterização do maciço, é calculado com base nas famílias principais de descontinuidades e de todas as descontinuidades registadas. É um parâmetro que apenas serve de referência entre muitos outros dados do maciço, pois a sua interpretação singular pode levar a erros de avaliação;
- Através do ensaio com o Martelo de Schmidt, o maciço rochoso foi classificado, segundo a ISRM (1981), como sendo do tipo S2 (resistência elevada): o valor médio da resistência é de 80,43 MPa;
- A partir do ensaio de carga pontual (Point Load Test, PLT), obteve-se o valor do índice de resistência à carga pontual que é 11,79 MPa, o qual permitiu estimar a resistência à compressão uniaxial de cerca de 260 MPa. Contudo, os resultados do ensaio PLT foram encarados numa forma informativa, visto que foram apenas seleccionados dois pontos do maciço em estudo. O ensaio esclerométrico foi o escolhido para a caracterização da resistência do maciço rochoso pois através deste conseguiu-se abranger a maior área de estudo.
- A presente dissertação pretende demonstrar, como o estudo da influência dos parâmetros geotécnicos contribui para a qualidade do desmonte de Maciços Rochosos fracturados. Contudo, sabe-se que as características do maciço rochoso apresentam uma elevada dificuldade de equacionar devido à sua anisotropia natural. A caracterização das características geológicas e geotécnicas do maciço fez-se através da aplicação da técnica de amostragem linear em superfícies expostas do maciço com a finalidade de definir o grau de compartimentação deste.
- Na análise da variação do desvio e do ângulo de intersecção entre o furo e a descontinuidade que o intersecta, constatou-se que existe um ângulo entre os 15º e os 20º que influencia o sentido do desvio, ou seja, para ângulos inferiores a 15º o furo acompanha a descontinuidade e para ângulos superiores a 20º o furo atravessa a descontinuidade. Verificou-se também, que alguns parâmetros geotécnicos influenciam directamente o desvio do furo. Assim, em furos que intersectam descontinuidades “Abertas”, verificou-se um maior desvio que furos que intersectam descontinuidades “Fechadas”. Constatou-se que todas as descontinuidades “Fechadas” não possuíam qualquer tipo de preenchimento, logo, verificou-se que descontinuidades sem preenchimento apresentam menores desvios que descontinuidades com preenchimento.

No que diz respeito ao parâmetro rugosidade, não foi possível chegar a uma conclusão significativa, visto que a maioria das descontinuidades foram classificadas como “Planas”.

A temática desenvolvida nesta dissertação poderá merecer estudos futuros. Assim, tendo em consideração os objectivos traçados para esta dissertação, sugere-se que as investigações a realizar futuramente incidam sobre:

- Reconhecimento geológico de superfície, recorrendo a estudos de cartografia geológico-estrutural da área dos maciços circunvizinhos;
- Estudo de pormenor da fracturação e da geomecânica do maciço em bancadas criteriosamente seleccionadas para complementar e aprofundar os estudos da influência dos parâmetros geotécnicos em maciços rochosos fracturados;
- Abordagem de outros maciços rochosos para obter diferentes cenários geológicos, geotécnicos e geomecânicos para reforçar e avaliar a influência dos parâmetros geotécnicos no desvio de perfuração;
- Continuar a investigar a relação entre ângulos de intercepção furo/descontinuidades e desvios de perfuração.

CAPÍTULO V



Mina de Diamantes, Canadá

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bieniawski Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Interscience, John Wiley & Sons, New York, 272 pp.

Bock, H., 2006. Common ground in engineering geology, soil mechanics and rock mechanics: past, present and future. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 65: 209-216.

Brady, B. H. G. & Brown, E. T., 2004. Rock mechanics for underground mining, 3rd Edition, George Allen & Unwin, London. 527 pp.

Brown, E. T., 1991. Da teoria à prática em mecânica das rochas. *Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros*, Ano IV, 48: pp. 9-29.

CFCFF – Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, 1996, Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications. National Research Council, National Academy Press, 568 pp.

Chaminé, H. I. & Gaspar, A. F., 1995, Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear. Aplicação a uma travessa da Mina de Carvão de Germunde Estudos, Notas & Trabalhos Inst. Geol. Min., Porto, 37: 97-111.

Day, M.J. and Goudie, A.S. 1977: Field assessment of rock hardness using the Schmidt test hammer. *BGRG Technical Bulletin* 18, 19–29.

Day, M.J. 1980: Rock hardness: field assessment and geomorphic importance. *Professional Geographer* 32, 72–81.

Dinis da Gama, C., 1995. Aspectos geotécnicos y de fracturación en la explotación de Canteras. In: López Jimeno, C. (Ed.). Cap. 10 del Manual de Rocas Ornamentales. Entorno Gráfico. S.L., Madrid, pp. 231-246.

Ferrer, M. & González de Vallejo, L. [eds.], 1999, Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rochosos en afloramientos. Publicaciones ITGE, Madrid. 81 pp, 41 fotografías.

Fonseca, 2008. Interação e avaliação entre o maciço rochoso e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 225 pp. (Tese de Mestrado).

Fonseca, L., Ramos, L., Galiza A. C. & Chaminé H.I., 2010. Avaliação geomecânica de maciços rochosos fracturados e as tecnologias de perfuração: consequência técnico-económicas. In: Gomes Correia A. et al. (eds), Actas do 12 Congresso Nacional de Geotecnia (Geotécnica e Desenvolvimento Sustentável), SPG/UM, Guimarães.

González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M; Ortuño, L. & Oteo, C. [coords.], 2002. Ingeniería geológica Prentice Hall, Madrid, 715 pp.

Goodman, R., 1993. Engineering geology: Rock in engineering construction. John Wiley & Sons, New York, 412 pp.

GSE – Geological Society Engineering Group Working Party Report, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society, 28 (3): pp. 207-242

Hoek, E., 2007. Practical rock engineering. RocScience: Hoek's Corner, 342 pp.

Holmberg, R., [Editor], 2003. Explosives and blasting technique. Proceeding of the EFEE 2nd World Conference. Taylor & Francis, 632 pp.

Hudson, J. A & Priest, S. D., 1983. Discontinuity frequency in rock masses Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 20: pp. 73-89.

I.S.R.M. – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 2007. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Ankara, Turkey. 628 pp.

I.S.R.M. – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics. 15 (6): pp. 319-368.

I.S.R.M. – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 1981. Basic geotechnical description of rock masses Int. Journ. Rock Mech. Sci. & Geom. Abstr., 18: pp. 85-110

I.S.R.M. – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 1987. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rock Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr., 15: pp. 89-97

I.S.R.M. – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 1985. Suggested method for determining point load strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geom. Abstr., 22.

IAEG – International Association Engineering Geology, 1981b. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Bulletin IAEG, 24: 235-274.

IAEG – International Association Engineering Geology, 1981a,. Recommended symbols for engineering geological mapping, Bulletin IAEG, 24: 227-234.

IAEG – International Association Engineering Geology, 1982. The Volumetric joint count – A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing.

IAEG – International Association Engineering Geology, 2005. Special purpose mapping for waste disposal sites. Bulletin IAEG, 64: 1-54.

Jimeno, C.L., 1995. Drilling and blasting of rocks. Taylor & Francis, 400 pp.

Langefors, U. & Kihlstrom, B., 1978. The modern technique of rock blasting. 3rd revised edition. John Wiley and Sons Ltd, New York, 438 pp.

Lisle R.J. & Leyshon P.R., 2004. Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers. Second Edition, Cambridge University Press. 112 pp.

Martins, R., Moreira, P., Santos Pereira, Neto, E., Pereira, A. M., Teixeira, J.; Vieira, A. & Chaminé, H.I., 2006. A técnica de amostragem linear aplicada a estudos de compartimentação de maciços rochosos no norte de Portugal. In: Actas do 10º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia / Univ. Nova de Lisboa, Maio de 2006. Volume 1, pp. 255-264.

Mandl, G., 2005. Rock Joints: the mechanical genesis. *Springer-Verlag*, 221 pp.

Mello Mendes, F., 1967-68, Mecânica das rochas. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 541pp.

Monteiro, E. 199. Monografia do Marco de Canaveses I e II. Edição da Câmara Municipal de Marco de Canaveses. Pp. 309-316

NP EN 1702-2, 2002 – Resistência à fragmentação – Coeficiente de Los Angeles, Marcação CE Directiva 89/106/CE.

Olofsson, S., 2002. Applied explosives technology for construction and mining. 12th edition. Applex, Arla, Sweden, 304pp.

Palmstrom, A., 1995. RMI: a rock mass characterization system for rock engineering purposes. University of Oslo, 400 p. (Tese de Doutoramento).

Palmstrom, A. & SINGH R., 2001. The deformation modulus of rock masses: comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16 (3): 115-131.

Palmstrom, A., 2001, *Measurement and Characterization of Rock Mass Jointing*, 46pp.

Pereira, J. J. C. P., 1985, *Caracterização geotécnica de maciços rochosos*. Universidade Nova de Lisboa. 404 pp., Tese de Mestrado.

Persson, P. A.; Holmberg, R. & Lee, J., 1993. *Rock blasting and explosives engineering*. CRC Press. 560 pp.

Press, F. & Siever, R., 1998. *Understanding Earth*. Second edition. W. H. Freeman and Company, New York. 682 pp.

Prince D.G., 2009. *Engineering Geology: Principles and Practice*. Springer. 450 pp.

Priest, S. D. & Hudson, J. A., 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18.

Priest S.D., 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman and Hall. London, 473 pp.

Ramos, L., 2008. Avaliação geotécnica e geomecânica de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. *Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP*, 197 pp. (Tese de mestrado, não publicada).

Rocha, M., 1981. *Mecânica das Rochas*. LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 445 pp.

Sodré Borges, 2002. *Geologia Estrutural*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Terzaghi, R., 1965. Sources of errors in joint surveys. *Geotechnique*, 15: 287-304.

Vidal Romani, J. R. & Twidale, C. R., 1999. Sheet fractures, other stress forms and some engineering implications. *Geomorphology*, 31 (1-4): 13-27.

CAPÍTULO VI



Mina de Ouro, Austrália

6. ANEXOS

Anexo I: Localização da pedreira da Curviã (CD)

Anexo II: Ortofotomapa da área envolvente da pedreira da Curviã (CD)

Anexo III: Carta geológica da área envolvente da pedreira da Curviã (CD)

Anexo IV: Fichas de levantamento de campo (Geológico - Geomecânico) (CD)

Anexo V: Fichas de levantamento de campo (Geomecânico - Martelo de Schmidt) (CD)

Anexo VI: Representação esquemática dos painéis (CD)

Anexo VII: Relatório dos ensaios de Boretrak (CD)

Anexo VIII: Relatório do ensaio Laser (CD)